

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

**Typové transformátory malých výkonů – Měření magnetického pole  
v jejich okolí**

Types Transformers of Small Power – Measuring of Magnetic Field in  
the Surrounding

## Zadání bakalářské práce

Student: **Marek Hřivnacký**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika  
Téma: Typové transformátory malých výkonů - Měření magnetického pole v  
jejich okolí  
Types Transformers of Small Power - Measuring of Magnetic Field in  
the Surrounding

Zásady pro vypracování:

- 1) Teoretický rozbor: Transformátory - obecné principy a závislosti, magnetické obvody a sycení. Principy elektromagnetického pole.
- 2) Rozbor sycení magnetického jádra toroidního transformátorů. Základní principy měření magnetických polí.
- 3) Experimentální zjišťování rozložení magnetického pole v okolí typových toroidních jader a transformátorů.
- 4) Zhodnocení a závěr.


Seznam doporučené odborné literatury:

Draxler, K.: Magnetické prvky a měření, CVUT, Praha, 1999  
Trnka, Z., Dufek, M., Hrabák, J.: Magnetická měření, SNTL, Praha, 1966  
Brož, J.: Moderní problémy feromagnetismu, Academia, Praha, 1962  
Dědek, L.: Teorie elektromagnetického pole, VUT, Brno, 1990  
Haňka, L.: Teorie elektromagnetického pole, SNTL, Praha, 1975  
firemní katalogy a prospekty


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Marek, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2011  
Datum odevzdání: 04.05.2012

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry

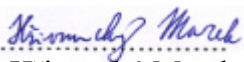


  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 3.5.2012

  
Hřivnacký Marek

## Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je experimentální analýza rozložení magnetického pole v okolí typových transformátorů malých výkonů. V teoretické části práce jsou uvedeny základní pojmy z oblasti magnetismu, seznámení s problematikou transformátorů a magnetických materiálů, které slouží k výrobě magnetických obvodů pro transformátory.

Hlavní část této práce je zaměřena na analýzu magnetického pole, v okolí toroidního transformátoru, při stavu naprázdno a při různých napájecích napětích.

## Abstract

The aim of this work is the experimental analysis of distribution of the magnetic field around the type of small power transformers. The theoretical part presents basic concepts of magnetism, an introduction to the issue of transformers and magnetic materials used to manufacture magnetic circuits for transformers.

The main part of this work is focused on the analysis of the magnetic field around the toroidal transformer at no load condition and at different voltages.

## Klíčová slova

Magnetická indukce, Magnetický tok, Maxwellovy rovnice, Transformátor, Proud naprázdno, Toroidní transformátor, BH charakteristika, Ztráty při střídavém magnetování.

## Key words

Magnetic induction, magnetic flux, Maxwell's equations, transformer, load current, toroidal transformer, BH characteristic for AC magnetization losses.



## Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Martinu Markovi PhD., za cenné rady, věcné připomínky, vedení a pomoc při realizaci této práce, bez kterých by nemohla vzniknout. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za obrovskou podporu a trpělivost při mém studiu.

## Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Název	Značka
B	Magnetická indukce	[T]
B <sub>m</sub>	Maximální magnetická indukce	[T]
B <sub>n</sub>	Složka indukce kolmá k ploše dS	[T]
B <sub>s</sub>	Indukce v saturaci	[T]
C <sub>p</sub>	Parazitní kapacita	[F]
D	Elektrická indukce	[C/m <sup>2</sup> ]
d	Průměr	[m]
d <sub>o</sub>	Vnější průměr jádra	[m]
d <sub>i</sub>	Vnitřní průměr jádra	[m]
E	Intenzita elektrického pole	[V/m]
e	Elektromotorická síla	[-]
F	Síla	[N]
F	Část okna jádra vyplněného vinutím	[-]
f	Frekvence	[Hz]
f <sub>mez</sub>	Mezní kmitočet	[Hz]
H	Intenzita magnetického pole	[A/m]
H <sub>a</sub>	Pole anizotropie	[A/m]
h	Výška	[m]
I	Elektrický proud	[A]
I <sub>1</sub>	Proud primárního vinutí	[A]
I <sub>2</sub>	Proud sekundárního vinutí	[A]
I <sub>K</sub>	Zkratový proud	[A]
I <sub>N</sub>	Jmenovitý proud	[A]
J	Vektor magnetické polarizace	[T]
K <sub>e</sub>	Činitel tvaru křivky indukovaného napětí K <sub>e</sub> = 1,11	[-]
L	Indukčnost	[H]
l	délka	[m]
l <sub>stř</sub>	Délka střední siločáry	[m]
M	Magnetický moment	[A/m]
N <sub>1</sub>	Počet závitů primárního vinutí	[-]
N <sub>2</sub>	Počet závitů sekundárního vinutí	[-]
P <sub>1</sub>	Příkon	[W]
P <sub>2</sub>	Výkon	[W]
P <sub>h</sub>	Hysterezní ztráty	[W]
P <sub>v</sub>	Ztráty vířivými proudy	[W]
P <sub>ž</sub>	Ztráty magnetickým zpožděním	[W]
Q	Elektrický náboj	[C]
R	Odpor	[Ω]
R <sub>1</sub>	Odpor primárního vinutí	[Ω]
R <sub>21</sub>	Odpor sekundárního vinutí přepočítaný na primární stranu	[Ω]
R <sub>ekv</sub>	Ekvivalentní odpor	[Ω]
R <sub>H</sub>	Hallova konstanta	[Ω.m/T]
r <sub>i</sub>	Vnitřní poloměr jádra	[m]

$r_o$	Vnější poloměr jádra	[m]
$r_{stf}$	Poloměr střední siločáry	[m]
$S$	Plocha	[m <sup>2</sup> ]
$S_{Fe}$	Průřez jádra	[m <sup>2</sup> ]
$S_{hd}$	Plocha uzavřené dynamické smyčky	[J/m]
$S_{h0}$	Plocha statické hysterezní smyčky	[J/m <sup>3</sup> ]
$s$	Hloubka vniku	[m]
$T$	Perioda	[s]
$T_C$	Curieho teplota	[°C]
$U$	Napětí	[V]
$U_1$	Napětí primárního vinutí	[V]
$U_2$	Napětí sekundárního vinutí	[V]
$U_{21}$	Napětí přepočtené na primární stranu	[V]
$U_K$	Napětí zdroje, kdy zkrat. transformátorem protéká $I_N$	[V]
$U_m$	Magnetické napětí	[V]
$u_i$	Indukované napětí	[V]
$u_H$	Hallovo napětí	[V]
$u_k$	Poměrné napětí nakrátko	[%]
$V_{\dot{z}}$	Objem magnetovaného materiálu	[m <sup>3</sup> ] v
Rychlost	[m/s]	
$W_a$	Energie anizotropie	[J/m <sup>3</sup> ]
$w$	Měrná energie	[J/m <sup>3</sup> ]
$X_{\sigma}$	Rozptylová reaktance	[Ω]
$X_{\sigma 1}$	Rozptylová reaktance primárního vinutí	[Ω]
$X_{\sigma 21}$	Rozptylová reaktance sekundárního vinutí přepočtená na primární stranu	[Ω]
$Z$	Impedance vinutí	[Ω]
$\eta$	Účinnost	[-]
$\kappa$	Susceptibilita	[-]
$\mu_r$	Relativní permeabilita	[-]
$\mu_0$	Permeabilita vakua	[H/m]
$\rho$	Vektor hustoty proudu	[A/m <sup>2</sup> ]
$\rho$	Měrný odpor	[Ω.m]
$\rho_Q$	Objemová hustota náboje	[Ω/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Proudová hustota	[A/m <sup>2</sup> ]
$\Phi$	Magnetický tok	[Wb]
$\Phi_c$	Celkový magnetický tok	[Wb]
$\Phi_L$	Magnetický tok v cívce	[Wb]
$\Psi$	Elektrický tok	[C]

## Obsah

---

1.	Úvod .....	11
2.	Základní pojmy z oblasti magnetismu.....	12
2.1	Magnetická indukce .....	12
2.2	Magnetický tok.....	12
2.3	Intenzita magnetického pole .....	13
2.4	Magnetická polarizace.....	13
2.5	Faradayův indukční zákon .....	13
2.6	Lenzovo pravidlo.....	14
2.7	Biot – Savartův zákon: .....	14
2.8	Soustava Maxwellových rovnic .....	14
3.	Transformátory.....	17
3.1	Princip činnosti transformátoru .....	17
3.2	Magnetický obvod.....	17
3.3	Typy transformátorů podle jader.....	18
3.4	Vinutí transformátorů.....	19
3.4.1	Návrh vinutí .....	19
3.5	Transformátor naprázdno .....	20
3.6	Magnetizační proces.....	21
3.7	Transformátor nakrátko.....	21
3.8	Náhradní schéma transformátoru .....	23
3.9	Náhradní schéma transformátoru s převodem 1:1.....	23
3.10	Toroidní transformátory .....	24
3.10.1	Návrh toroidního transformátoru.....	24
4.	Magnetické vlastnosti látek.....	28
4.1	Anizotropie.....	28
4.2	Magnetostrikce .....	28
4.3	$B=f(H)$ charakteristika.....	28
4.3.1	Amplitudová magnetizační charakteristika .....	28
4.3.2	Dynamická hysterezní smyčka.....	29
4.4	Ztráty při střídavém magnetování .....	29
4.4.1	Rozdělení ztrát při střídavém magnetování.....	29
4.5	Diamagnetismus .....	31
4.6	Paramagnetismus.....	31
4.7	Feromagnetismus .....	31

4.7.1	Feromagnetikum v magnetickém poli .....	32
4.7.2	Feromagnetické materiály .....	32
4.7.3	Střídavé magnetování .....	32
4.7.4	Prvotní magnetování fero-ferimagnetika.....	33
4.7.5	Hysterezní smyčka – proces přemagnetování fero-, ferimagnetických látek .....	33
4.7.6	Hysterezní křivka fero- , ferimagnetického materiálu.....	34
5.	Materiály používané k výrobě magnetických obvodů .....	35
5.1	Magneticky měkké materiály .....	35
5.1.1	Křemíkové oceli .....	35
5.1.2	Permalloye.....	37
5.1.3	Amorfni a nanokrystalické materiály .....	37
5.1.4	Nanokrystalické materiály.....	37
5.1.5	Magneticky měkké ferity .....	38
6.	Magnetická měření .....	39
6.1	Magnetické senzory.....	39
6.1.1	Sensory s Hallovou sondou .....	39
6.1.2	Anizotropní magnetorezistor (AMR) .....	40
6.1.3	Fluxgate (Feromagnetická sonda) .....	41
6.1.4	Měřicí cívka .....	41
6.1.5	Rezonanční teslametry .....	42
6.1.6	Magnetooptické senzory .....	42
6.1.7	Supravodivé magnetometry.....	42
7.	Experimentální část.....	43
7.1	Cíl měření.....	43
7.2	Postup měření .....	43
7.3	Měřicí soustava .....	43
7.4	Použité měřicí přístroje .....	44
7.5	Měření č. 1 .....	47
7.5.1	Naměřené hodnoty .....	47
7.5.2	Grafy a průběhy naměřených veličin .....	48
7.6	Měření č. 2 .....	58
7.6.1	Poloměr střední siločáry.....	58
7.6.2	Naměřené hodnoty .....	58
7.6.3	Grafy a průběhy naměřených veličin .....	59
7.7	Měření č. 3 .....	62

7.7.1	Naměřené hodnoty .....	62
7.7.2	Grafy a průběhy naměřených veličin .....	62
8.	Zhodnocení experimentu a závěr .....	66
	Seznam literatury .....	67
	Seznam příloh .....	69

## 1. Úvod

---

Bakalářská práce se zabývá transformátory malých výkonů a je zaměřena na rozložení magnetického pole v jejich okolí. V druhé kapitole jsou uvedeny základní pojmy z oblasti elektromagnetismu společně se stručně vysvětlenými základními magnetickými veličinami. Následující kapitola popisuje problematiku transformátorů. Zde je uveden princip činnosti transformátoru, jeho základní části, společně s návrhem transformátoru klasického i toroidního. Součástí této kapitoly je i stručný popis provozních stavů transformátoru. Další kapitola popisuje vlastnosti magnetických materiálů, rozdíl mezi feromagnetikem, paramagnetikem a diamagnetikem společně s uvedenými zástupci těchto druhů látek. V poslední část kapitoly je rozebráno téma střídavého magnetování magnetických látek a s tím související ztráty při střídavém magnetování. Pátá kapitola je zaměřena na materiály pro výrobu magnetických obvodů transformátorů. Jsou zde uvedeny a stručně popsány druhy a vlastnosti materiálů pro tyto obvody. Následující kapitola se věnuje problematice magnetických měření, respektive obsahuje stručný přehled magnetických sond a Teslametrů dostupných na trhu včetně rozsahů, principů snímání a vlastností senzorů. Další část této práce tvoří vlastní experiment, ve kterém jsou uvedeny metody postupů jednotlivých měření, změřené výsledky, grafické závislosti a časové průběhy z osciloskopů. Poslední kapitolu tvoří vyhodnocení výsledků vlastního měření, osobní přínos této práce a její další možné využití v budoucnu.

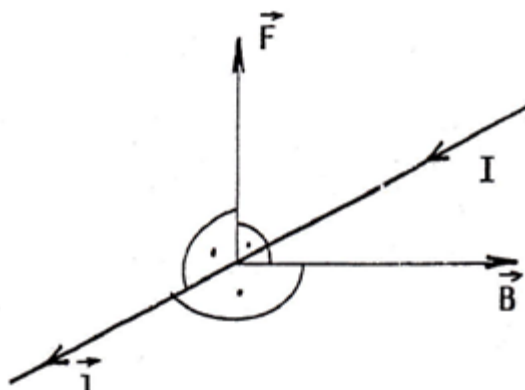
## 2. Základní pojmy z oblasti magnetismu

---

### 2.1 Magnetická indukce

Magnetická indukce  $B$  je vektorová veličina, definovaná silou  $F$  působící na vodič délky  $l$ , jímž prochází elektrický proud  $I$ . Jednotkou magnetické indukce je 1 T:

$$F = I[l \times \vec{B}]; F = B \cdot I \cdot l \quad [\text{N}; \text{A}, \text{m}, \text{T}] \quad (2.1.1)$$



Obr. 2.1 Síla působící na vodič [1]

### 2.2 Magnetický tok

Magnetický tok  $\Phi$  je skalární veličina definovaná napětím  $u_i$ , které se indukuje v závitě při časové změně toku:

$$u_i = \frac{d\Phi}{dt} \quad [\text{V}; \text{Wb}, \text{s}] \quad (2.2.1)$$

Magnetickému toku 1 Wb (Weber) odpovídá indukované napětí 1 V, které vznikne v závitě obepínajícím tok při rovnoměrném poklesu toku z jednotkové hodnoty na nulu v čase  $t = 1\text{s}$ .

Tok lze také definovat pomocí vztahu:

$$\Phi = \iint_S \vec{B} d\vec{S} = B_n dS \quad [\text{Wb}; \text{T}; \text{m}^2] \quad (2.2.2)$$

kde  $B_n$  je složka  $B$  kolmá k ploše  $dS$ . Podle tohoto vztahu jednotkový tok prochází v homogenním poli plochou  $S = 1\text{ m}^2$ , kolmou ke směru  $B$ , při magnetické indukci  $B = 1\text{ T}$ . Je-



li pole homogenní a vektor  $B$  kolmý k ploše  $S$ , dostaneme:

$$\Phi = B \cdot S \quad [\text{Wb}; \text{T}, \text{m}^2] \quad (2.2.3)$$

Magnetické pole má vírový charakter, bez zdroje toku, proto tok vycházející z uzavřené plochy je vždy roven nule:

$$\iint_S B_n d\bar{S} = 0 \quad (2.2.4)$$

## 2.3 Intenzita magnetického pole

Intenzita magnetického pole  $H$  je vektorová veličina definovaná z I. Maxwellovy rovnice, podle které je ve vzdálenosti  $r$  od přímého, velmi dlouhého vodiče s proudem  $I$  intenzita magnetického pole.

$$\bar{H} = \frac{I}{2\pi r} \quad [\text{A} \cdot \text{m}^{-1}; \text{A}, \text{m}] \quad (2.3.1)$$

Jednotkou intenzity magnetického pole je  $1 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ , což je intenzita pole ve vzdálenosti  $r = 1/(2\pi) \text{ m}$  od vodiče s proudem  $I = 1 \text{ A}$ . Souvislost intenzity pole a indukce je dána vztahem

$$\bar{H} = \frac{\bar{B}}{\mu_r \mu_0}; \bar{B} = \mu_r \mu_0 \bar{H} \quad (2.3.2)$$

kde  $\mu_r$  je relativní permeabilita, pro vakuum a prakticky i pro vzduch je rovna jedné a  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$  je magnetická konstanta - permeabilita vakua.

## 2.4 Magnetická polarizace

Magnetická polarizace je vektorová veličina, charakterizující magnetický stav látky. Vyjadřuje změnu magnetické indukce vyvolanou magnetickými vlastnostmi látek [1]:

$$\bar{J} = \bar{B} - \mu_0 \cdot \bar{H} = (\mu_r - 1) \cdot \mu_0 \cdot \bar{H} = \kappa \cdot \mu_0 \cdot \bar{H} \quad [\text{T}] \quad (2.4.1)$$

$$\kappa = \mu_r - 1$$

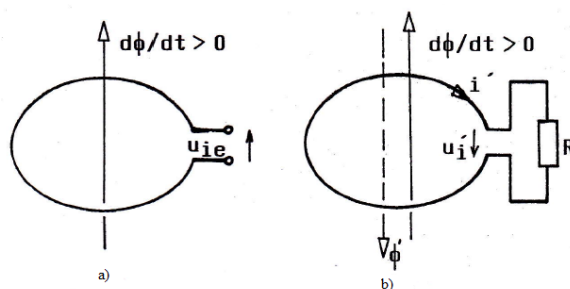
## 2.5 Faradayův indukční zákon

Napětí indukované na koncích vodiče je rovno časové změně indukčního toku, procházejícího plochou ohraničenou vodičem. Polarita indukovaného napětí je opačná než polarita napětí zdroje, který by při zdrojové orientaci dodával proud vyvolávající časovou změnu toku (viz. obr. 2.2 a)):

$$u_i = -\frac{d\phi}{dt} \quad (2.5.1)$$

## 2.6 Lenzovo pravidlo

Indukovaný proud má vždy takový směr, že magnetické pole jím vyvolané působí proti změně, která jej vyvolala (viz. Obr. 2.2 b))



Obr. 2.2 Indukované napětí [1]

## 2.7 Biot – Savartův zákon:

Pohybující se náboj působí na ostatní náboje magnetickou silou a vytváří kolem sebe magnetické pole. Velikost magnetického pole náboje  $Q_1$ , pohybujícího se rychlostí  $\mathbf{v}_1$ , je určeno magnetickou indukcí  $B$ . Magnetická indukce je dána Biot-Savartovým zákonem. Magnetická indukce udává, jakou silou působí bodový náboj  $Q_1$ , pohybující se rychlostí  $\mathbf{v}_1$ , na bodový náboj  $Q_r$  v bodě  $r$ , pohybující se rychlostí  $\mathbf{v}_r$ . [20]

V diferenciálním tvaru lze psát:

$$d\mathbf{B}(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3} \quad (2.7.1)$$

## 2.8 Soustava Maxwellových rovnic

Rovnice udávají vzájemné vztahy mezi vektory a zdroji pole. Byly odvozeny z experimentálně zjištěných zákonů, např. ze zákona elektromagnetické indukce.

### 2.8.1 První Maxwellova rovnice

Je zobecněním Faradayova zákona elektromagnetické indukce. Napětí indukované je rovno časové změně magnetického toku, procházejícího plochou, kterou smyčka ohraničuje:

$$u_i = - \frac{d\phi}{dt} \quad (2.8.1.1)$$

v integrálním tvaru je možné psát:

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad (2.8.1.2)$$

kde vektor  $\mathbf{E}$  je intenzita elektrického pole [3].

Pomocí Stokesovy věty převedeme na integrál plošný, protože rovnice platí pro libovolnou plochu, přepíšeme do tvaru první Maxwellovy rovnice.

$$\text{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (2.8.1.3)$$

## 2.8.2 Druhá Maxwellova rovnice

Zobecňuje Ampérov zákon celkového proudu. Magnetické napětí v uzavřené smyčce je rovno proudům procházejícím plochou, kterou smyčka ohraničuje:

$$U_m = \sum I \quad (2.8.2.1)$$

v integrálním tvaru

$$\oint_l \bar{H} \cdot d\bar{l} = \int_s \bar{J} \cdot d\bar{S} \quad (2.8.2.2)$$

Odvození druhé Maxwellovy rovnice je velice obtížné, proto hned přejdeme k integrálnímu tvaru, který byl odvozen použitím Stokesovy věty, Divergence a Gaussovy věty elektrostatiky:

$$\text{rot} \bar{H} = \bar{\rho} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (2.8.2.3)$$

Vektor  $\rho$  představuje hustotu indukčního proudu a vektor  $D$  elektrickou indukci [3].

## 2.8.3 Třetí Maxwellova rovnice

Třetí Maxwellova rovnice vyjadřuje princip kontinuity indukčních linií magnetického toku. Magnetický tok  $\Phi$  přes libovolnou uzavřenou plochu je roven nule:

$$\phi = 0 \quad (2.8.3.1)$$

vyjádřeno v integrálním tvaru

$$\oint_s \bar{B} \cdot d\bar{S} = 0 \quad (2.8.3.2)$$

Pomocí Gaussovy věty (Věta o divergenci) převedeme na objemový integrál:

$$\oint_s \bar{B} \cdot d\bar{S} = \int_V \text{div} \bar{B} \cdot dV \quad (2.8.3.3)$$

$$\int_V \text{div} \bar{B} \cdot dV = 0 \quad (2.8.3.4)$$

Rovnice musí platit pro libovolný objem  $V$ , bude splněna vždy, když

$$\text{div} \bar{B} = 0 \quad (2.8.3.5)$$

což je třetí Maxwellova rovnice v diferenciálním tvaru [3].

#### 2.8.4 Čtvrtá Maxwellova rovnice

Rovnice vychází z Gaussovy věty elektrostatiky. Elektrický tok z libovolného objemu ohraničeného uzavřenou plochou je roven náboji, který je uvnitř uzavřené plochy, konstantou úměrnosti je převrácená hodnota permitivity vakua:

$$\Psi = \frac{Q}{\varepsilon_0} \quad (2.8.4.1)$$

V integrálním tvaru:

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \oint_V \rho_Q \cdot dV \quad (2.8.4.2)$$

Obdobně jako v minulém případě převedeme integrál přes uzavřenou plochu na integrál objemový, protože tato rovnice musí platit pro libovolný objem, píšeme rovnou diferenciální tvar čtvrté Maxwellovy rovnice [3].

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (2.8.4.3)$$

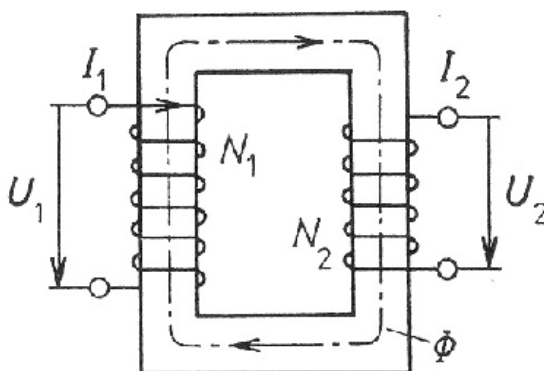
### 3. Transformátory

#### 3.1 Princip činnosti transformátoru

Transformátor je definován jako netočivý elektromagnetický stroj převádějící bez pohybu elektromagnetickou indukci střídavé nebo přerušované proudy, přiváděné do primárního vinutí, ve střídavé proudy nebo proudové impulsy odebírané ze sekundárního vinutí. Přenos elektrické energie transformátorem je možný v obou směrech, avšak většinou je transformátor používán v jednom směru energie. Z tohoto hlediska lze rozdělit transformátory:

- a) zvyšovací
- b) snižovací
- c) s přenosem energie v obou směrech.

Transformátor je založen na principu elektromagnetické indukce. Přiložíme-li na svorky vstupního vinutí střídavé napětí, pak tímto vinutím poteče proud, který vyvolá v magnetickém obvodu transformátoru střídavý magnetický tok  $\Phi$ . Předpokládáme-li dokonalý magnetický obvod, rozpojené výstupní vinutí, pak celý magnetický tok  $\Phi$  vybuzený ampérezávity vstupního vinutí je spřažen s výstupním vinutím, v němž se indukuje v každém okamžiku napětí.[7]



Obr. 3.1 Princip činnosti transformátoru[]

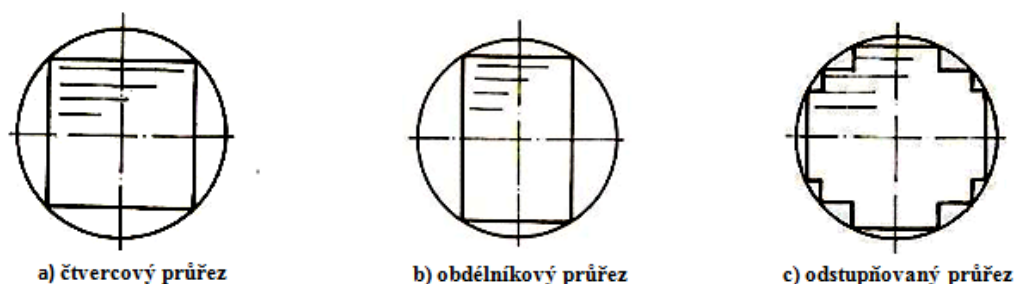
#### 3.2 Magnetický obvod

Magnetický obvod tvoří dráha magnetického toku  $\Phi$  s definovanou plochou průřezu upravenou tak, že je v ní soustředěna převážná část toku, jenom jeho malá část, tzv. rozptylový tok  $\Phi_r$ , se uzavírá mimo magnetický obvod. Obvod je tvořen feromagnetikem s permeabilitou  $\mu$  větší než jedna, což umožňuje směřovat tok do požadované dráhy. U transformátorů je zdrojem magnetického toku  $\Phi$  vinutí, kterým prochází proud.

Magnetický obvod je tvořen svazkem plechů z křemíkové oceli, vzájemně od sebe izolovaných. Plechy jsou z feromagnetického, magneticky měkkého materiálu, tloušťky 0,35 až 0,5 mm, izolace mezi nimi má tloušťku 0,05 mm (izolaci tvoří papír, lak, vrstva keramiky, fosfát). U některých transformátorů je magnetický obvod vyroben z plechů orientovaných - válcovaných za studena. Materiál jádra má rozhodující vliv na vlastnosti transformátoru:

Feromagnetický materiál – zesiluje magnetický tok, magneticky měkký materiál – úzká hysterezní smyčka, menší ztráty při přemagnetování. Izolace mezi plechy zabraňuje průchodu vířivých proudů. Plechy válcované za studena – mají přibližně o 1/3 nižší ztráty (uvádějí se W na kg materiálu) [5].

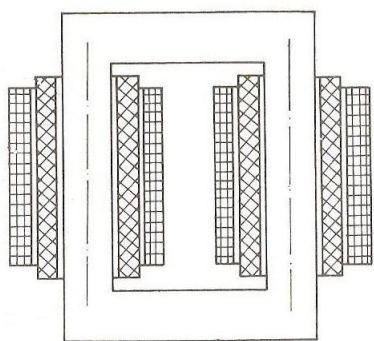
Jádra malých transformátorů mají průřez tvaru čtverce nebo obdélníku, u velkých transformátorů se dělá průřez odstupňovaný, jelikož mají kotoučové cívky, vznikla by okolo čtvercového jádra velká vzduchová mezera a vznikly by větší ztráty způsobené rozptylovým magnetickým tokem. Proto je průřez jádra odstupňovaný, aby se co nejlépe vyplnila kruhová dutina cívek.



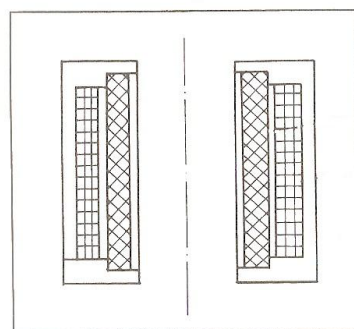
Obr. 3.2 Typy průřezu magnetických obvodů [5]

Plechy magnetického obvodu, se vystřihují podle typu transformátoru ve tvaru písmen E, M, I, L, U

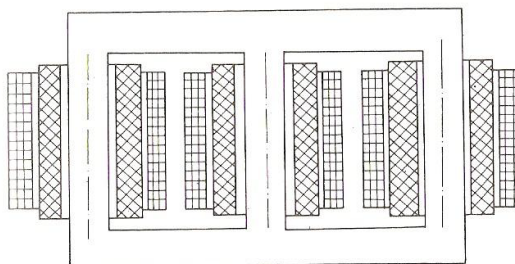
### 3.3 Typy transformátorů podle jader



Obr. 3.3 Jádrový transformátor [5]



Obr. 3.4 Plášťový transformátor [5]



Obr. 3.5 Třífázový transformátor [5]

### 3.4 Vinutí transformátorů

Vinutí se zhotovuje navinutím vodiče na cívkové tělísko (kostru), u kruhových jader se vinutí navinuje přímo na izolované jádro. Vinutí u bezjádrových transformátorů je zhotoveno z koaxiálních vodičů. Vinutí spolu s jádrem umožní dosáhnout požadované indukčnosti, současně s tím je spojen vznik nežádoucích jevů – odpor vinutí, rozptylová indukčnost, dielektrické ztráty a u silových transformátorů vývin tepla. Úkolem výpočtu a návrhu vinutí je udržet tyto nežádoucí vlivy v přijatelných mezích.

Nejčastěji se pro vinutí transformátorů používá lakovaného vodiče LC z měkké elektrovedné mědi. Vodiče LC s lepící vrstvou jsou dobře slinovatelné. Vyrábějí se s jednoduchou nebo zesílenou izolací. Zesílená izolace zvětšuje průměr vodiče tak, že například průměr vodiče o čistém průměru 0,02 mm vzroste o 15%. Na výrobu izolovaných vinutí, jejichž konce lze přímo pájet, se používá polyuretanovým lakem izolovaného vodiče.

Vlivem povrchového jevu se zvyšujícím se kmitočtem zvětšuje se odpor vodiče. Pro zmenšení povrchového jevu používá se vysokofrekvenčních lanek. Lanka jsou vyrobena ze stočených lakovaných tenkých vodičů s určitou délkou zkrutu. Lanko je jednou až dvakrát opředeno hedvábím. Podle normy ČSN IEC 317 – 11 se značí ZCA. Z je značka vf. vodiče, C značí jádro z mědi a A opředení hedvábím [5].

#### 3.4.1 Návrh vinutí

*Určení výstupního napětí a proudu*

$$U_2, I_2 \quad [\text{V}, \text{A}] \quad (3.4.1.1)$$

*Výpočet výstupního výkonu transformátoru*

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \quad [\text{V} \cdot \text{A}] \quad (3.3.1.2)$$

*Výpočet příkonu*

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} \quad [\text{V} \cdot \text{A}] \quad (3.3.1.3)$$

*Vstupní proud primárním vinutím*

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1} \quad [\text{A}] \quad (3.3.1.4)$$

*Určení plechů a cívky*

$$S_{Fe} = 1,2 \cdot \sqrt{P_1} \quad [\text{m}^2] \quad (3.3.1.5)$$

*Počet závitů na volt*

$$N = \frac{45}{S_{Fe}} \quad [\text{N/V}] \quad (3.3.1.6)$$

*Závity primárního a sekundárního vinutí*

$$N_1 = N \cdot U_1; N_2 = N \cdot U_2 \quad [\text{závitů}] \quad (3.3.1.7)$$

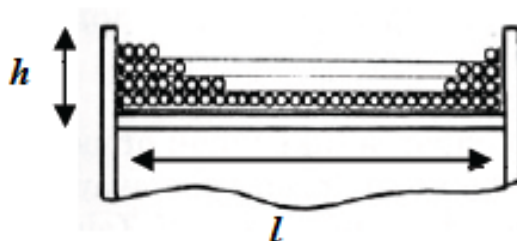
*Průměr drátu primárního a sekundárního vinutí*

$$d_1 = \sqrt{\frac{I_1}{2}}; d_2 = \sqrt{\frac{I_2}{2}} \quad [\text{m}] \quad (3.3.1.8)$$

### Výpočet realizace

Kvalita návrhu a výpočtu má zásadní vliv na výslednou realizaci. Před zahájením vlastní výroby transformátoru je vhodné provést technickou kontrolu návrhu.

Spočítáme, kolik se vejde do jedné vrstvy závitů a kolik je zapotřebí vrstev. Průměry drátu musíme počítat podle tabulky – každý závit je izolovaný – izolace zvětšuje průměr závitu. Nesmíme opomenout ani proklady mezi primárním a sekundárním vinutím. Tenký proklad by měl být i mezi závity, zpravidla každých 30 V. Při navíjení musíme dbát na správný počet závitů primární cívky. Navineme-li větší počet závitů, stane se z něj trafo s menším sycením jádra, tj. s menší magnetickou indukcí. Transformátor vytváří kolem sebe menší rušivé pole a zároveň se stává měkkým zdrojem napětí. Navineme-li méně závitů ( primárního vinutí ), transformátor bude mít vyšší sycení jádra, stane se z něj zdroj většího rušení (bude bzučet) a jeho sekundární napětí bude tvrdé. Přesycený transformátor se zahřívá i bez zátěže vinou velkých vířivých proudů [13].



Obr. 3.6 Okno pro závity [13]

Výška okna

$$h = \frac{a - \delta}{2} - t \text{ [m]} \quad (3.3.1.9)$$

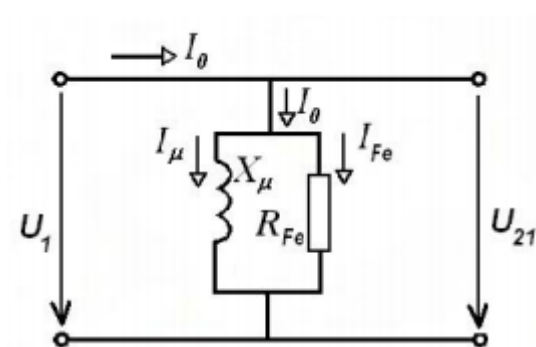
Délka okna

$$l = c - 2 \cdot t \text{ [m]} \quad (3.3.1.10)$$

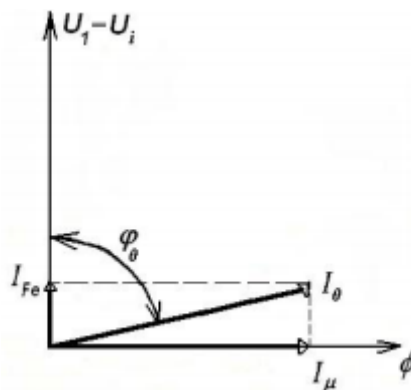
### 3.5 Transformátor naprázdno

Stav naprázdno nastává tehdy, když na sekundárním vinutí není připojena zátěž. Sekundární proud  $I_2=0$ . Primárním vinutím protéká magnetizační proud  $I_0$ , který je nutný pro vybuzení magnetického pole v magnetickém obvodu transformátoru při jmenovitém napětí  $U_{1n}$ . Magnetizační proud se skládá ze dvou složek. První složka proudu je induktivního charakteru a je posunuta o  $90^\circ$  za fázorem proudu. Představuje indukčnost  $L_\mu$  ( $X_\mu$ ) a hlavní tok v magnetickém obvodu. Druhá složka představuje ztráty v železe (hysterezní a ztráty vířivými proudy) a je ve fázi s vektorem napětí. Vyjádřit jí lze pomocí fiktivního odporu  $R_{Fe}$  na kterém ztráty vznikají. V náhradním schéma transformátoru neuvažujeme sekundární vinutí, protože jím neprotéká žádný proud a primární vinutí můžeme zanedbat (odebírá malý proud naprázdno)[12],[15].





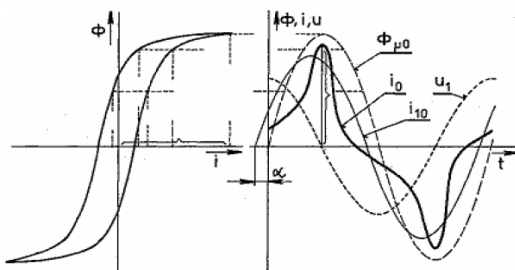
Obr. 3.7 Náhradní schéma transformátoru naprázdno [12]



Obr. 3.8 Fázorový diagram [12]

### 3.6 Magnetizační proces

Magnetická charakteristika transformátoru odpovídá hysterezní smyčce, jejíž plocha je úměrná ztrátám v magnetickém obvodu jádra. Jestliže přivedeme na vstupní svorky transformátoru napětí sinusového průběhu, pak za předpokladu, že vstupní napětí  $U_1$  při stavu naprázdno, je téměř rovno napětí  $U_i$  bude průběh tohoto napětí sinusový. Napětí  $U_i$  je indukováno magnetickým tokem  $\Phi_{\mu 0}$ , který má rovněž sinusový průběh (viz. Obr. 3.9).



Obr. 3.9 Průběh magnetizačního proudu [9]

Proud  $I_0$ , který transformátor odebírá při stavu naprázdno, se skládá z proudu magnetizačního  $I_\mu$  a proudu, který pokrývá ztráty v železe  $I_{Fe}$ . Magnetický tok je silně závislý na průběhu proudu naprázdno [9].

### 3.7 Transformátor nakrátko

Primární vinutí je připojeno ke zdroji napětí, sekundární vinutí je zkratováno bez odporového vodiče. Napětí na sekundární straně  $U_2=0$ . Magnetický obvod odebírá malý proud, který je vzhledem ke zkratovému proudu zanedbatelný. Magnetický obvod tedy můžeme v náhradním schématu zanedbat. Pro další zjednodušení přepočítáme náhradní schéma na jednoduchý sériový obvod rezistoru a indukčnosti:

$$R = R_1 + R_{21} \quad (3.7.1)$$

$$X_\sigma = X_{1\sigma} + X_{21\sigma} \quad (3.7.2)$$

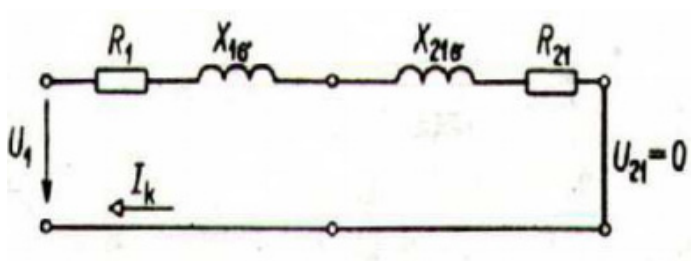
Velikost zkratového proudu  $I_k$  je přímo úměrná velikosti napětí zdroje a nepřímo impedanci vinutí:

$$I_k = \frac{U_n}{Z} \quad (3.7.3)$$

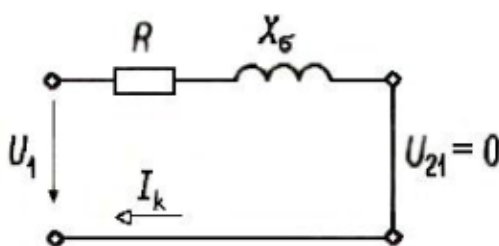
Napětí nakrátko  $U_k$  je hodnota napětí zdroje, kdy zkratovaným transformátorem protéká jmenovitý proud  $I_N$ . Napětí nakrátko se udává jako poměrné napětí nakrátko:

$$u_k = \frac{U_k}{U_n} 100 \quad [\%] \quad (3.7.4)$$

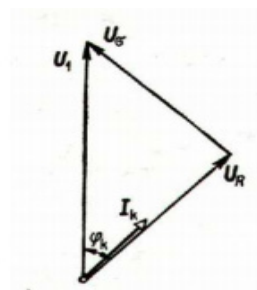
Poměrné napětí nakrátko je u velkých transformátorů 3 – 6 %.



Obr. 3.10 Náhradní schéma transformátoru nakrátko [12]



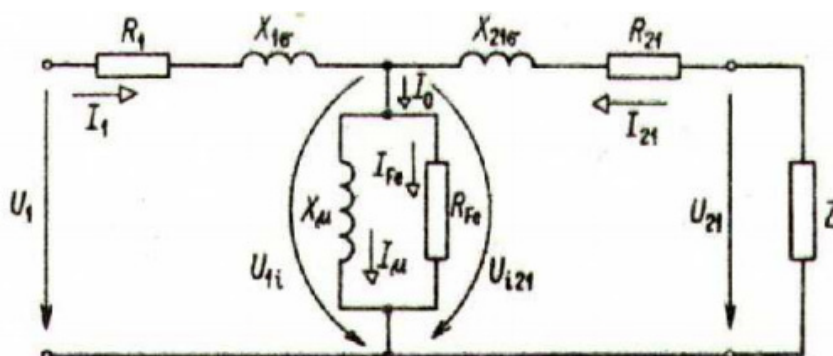
Obr. 3.11 Zjednodušené schéma transformátoru nakrátko [12]



Obr. 3.13 Fázorový diagram [12]

### 3.8 Náhradní schéma transformátoru

Náhradní schéma transformátoru představuje, jak se transformátor chová při zatížení.



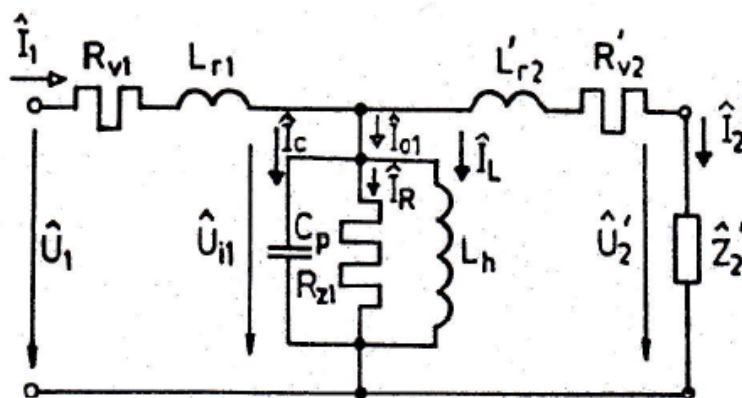
Obr. 3.14 Náhradní schéma transformátoru [12]

Paralelní obvod představuje jádro transformátoru, kterým prochází část proudu, tzv. magnetizační proud  $I_0$ , který vybudí magnetické pole a zároveň pokryje ztráty v železe. Ztráty v železe jsou hysteretzní a vířivými proudy a jsou reprezentovány odporem  $R_{Fe}$ . Magnetizační reaktance  $X_\mu$  magnetického pole jádra se chová jako cívka. Magnetický tok, který je vyvolán proudem  $I_0$  je zpožděn o  $90^\circ$  elektrických za napětím.

Sériový obvod reprezentuje primární a sekundární vinutí, na kterých vznikají úbytky  $R_1$  a  $R_{21}$ .  $X_{1\sigma}$  a  $X_{2\sigma}$  jsou rozptylové reaktance primárního a sekundárního vinutí. Část magnetického toku se uzavírá vzduchem – rozptylový magnetický tok. Tento tok se nepodílí na magnetické indukci v jádře. Napětí  $U_{21}$ , proud  $I_{21}$ , odpor  $R_{21}$  a reaktance  $X_{21\sigma}$  jsou hodnoty přepočtené na primární stranu [12].

### 3.9 Náhradní schéma transformátoru s převodem 1:1

Pro skutečný transformátor s převodem různým než 1 je nutné provést přepočet hodnot všech prvků na primární vinutí. Při přepočtu se vychází z faktu, že se nesmí změnit toky a magnetická napětí cívek ani výkony prvků ve schématu [1].



Obr. 3.15 Schéma transformátoru s převodem 1:1 [1]

Proudy, napětí a prvky při přepočtu určíme z těchto vztahů:

$$U'_2 = \frac{N_1}{N_2} U_2 \quad I'_2 = \frac{N_2}{N_1} I_2 \quad (3.9.1, 3.9.2)$$

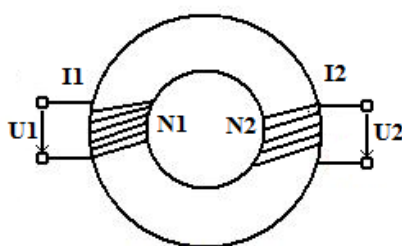
$$L_h = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 L_{h2} \quad C_p = C_{p1} + \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 C_{p2} \quad (3.9.3, 3.9.4)$$

$$R'_{v2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_{v2} \quad \hat{Z}'_2 = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \hat{Z}_2 \quad L'_{r2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 L_{r2} \quad (3.9.5, 3.9.6, 3.9.7)$$

### 3.10 Toroidní transformátory

Jádro toroidního transformátoru je tvořeno z jednoho pásu magnetického materiálu (křemíková ocel, permalloy nebo ferit v závislosti na frekvenci) ve tvaru prstence bez vzduchové mezery. Jádro je navinuto z jednoho pásu a zajišťuje, že hranice všech zrn budou orientovány v optimálním směru, tímto se sníží magnetický odpor a transformátor pracuje s větší účinností. Čím tenčí jádro, tím jsou ztráty v něm menší. Magnetický tok u toroidu s vysokou permeabilitou se uzavírá převážně v jádře. Primární a sekundární vinutí jsou navinuta tak, aby pokryla celý povrch jádra. Toto způsobuje, že má jádro tendenci se zahřívat, což je kompenzováno dobrou tepelnou vodivostí mědi. Je využito jevu vzájemné indukce, tzn., že obě vinutí, primární i sekundární mají stejný magnetický tok.

Při návrhu je počítáno s většími ztrátami ve vinutí než v jádře transformátoru, proto se je voleno vinutí s menším průřezem. Toroidy mají menší rozměry než klasické transformátory při stejném výkonu.



Obr. 3.16 Toroidní transformátor [19]

#### 3.10.1 Návrh toroidního transformátoru

Zvolené hodnoty:  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,

*Volba jádra transformátoru*

Jádro volíme tak, aby jeho rozměry a cena tvořily co nejoptimálnější kompromis. Rozměry jádra je možné vybrat z tabulek výrobců (viz Obr. 3.17).

TOROIDNÍ JÁDRA PRO STANDARTNÍ TOROIDNÍ TRANSFORMÁTORY				
ROZMĚR JÁDRA	HMOTNOST	PRŮŘEZ JÁDRA	DĚLKA STŘEDNÍ SILOČÁRY	VÝKON
( mm )	( kg )	( cm <sup>2</sup> )	( cm )	VA
35 x 22 x 15	0,063	0,97	8,95	7
50 x 30 x 20	0,182	2,00	12,56	20
63 x 38 x 20	0,290	2,50	15,85	32
63 x 38 x 25	0,360	3,12	15,85	40
70 x 40 x 20	0,380	3,00	17,27	50
70 x 40 x 25	0,474	3,75	17,27	62
70 x 40 x 32	0,606	4,80	17,27	80
80 x 50 x 25	0,560	3,75	20,41	100
80 x 50 x 32	0,716	4,80	20,41	120
80 x 50 x 40	0,896	6,00	20,41	180
100 x 50 x 32	1,377	8,00	23,55	220
100 x 50 x 40	1,722	10,00	23,55	300
100 x 60 x 32	1,176	6,40	25,12	260
100 x 60 x 40	1,470	8,00	25,12	340
120 x 60 x 32	1,970	9,60	28,26	380
120 x 60 x 40	2,500	12,00	28,26	500

Obr. 3.17 Tabulka rozměrů toroidních jader [17]

JAKOST	GARANTOVANÉ HODNOTY	
	B max (T) <sub>Heff</sub> = 3 A/m	B max (T) <sub>Heff</sub> = 30 A/m
„N“	0,055 min	1,30 min
„S“	0,075 min	1,40 min
„SU“	0,105 min	1,55 min
„SU EXTRA“	0,120 min	1,60 min

Obr. 3.18 Tabulka jakosti jader [17]

### Návrh vinutí transformátoru

Vztah pro primární napětí lze napsat

$$U_1 = 4,44 \cdot f \cdot B_S \cdot S_{Fe} \cdot N_1 \quad [\text{V}] \quad (3.10.1.1)$$

Z tohoto vztahu odvodíme vztah pro počet závitů primárního vinutí:

$$N_1 = \frac{U_1}{4,44 \cdot S_{Fe} \cdot f \cdot B_S} \quad [\text{závitů}] \quad (3.10.1.2)$$

kde  $S_{Fe}$  – průřez jádra

$f$  – frekvence

$B_S$  – indukce v nasycení

$U_1$  – primární napětí

Pozn.: V cizojazyčné literatuře se někdy setkáváme s pojmem „Waveform factor“, což je faktor průběhu, který je pro sinusový průběh  $W_f = 1,1$  a pro obdélníkový průběh roven 1 [18].

Výpočet závitů sekundárního vinutí

$$N_2 = \frac{N_1}{U_1} \cdot U_2 \quad [\text{závitů}] \quad (3.10.1.3)$$

kde  $N_1$  – počet závitů primárního vinutí

$U_2$  – zvolené výstupní napětí

Výpočet délek vinutí

Pro výpočet odporu sekundárního a primárního vinutí je nutné znát délku vinutí, kterou vypočítáme z následujících vztahů

$$l_1 = \left[ 2h + d_o + d_i \cdot \left( 1 - 2\sqrt{1 - \frac{F}{2}} \right) \right] \text{ [cm]} \quad (3.10.1.4)$$

$$l_2 = \left[ 2h + d_o + d_i \cdot \left( 3 - 2\sqrt{1 - \frac{F}{2}} - 2\sqrt{1 - F} \right) \right] \text{ [cm]} \quad (3.10.1.5)$$

kde  $l_1, l_2$  – délky vinutí

$h$  – výška jádra

$d_o, d_i$  – vnější a vnitřní průměr jádra

$F$  – část okna jádra vyplněného vinutím [18]

*Odpor vinutí transformátoru*

$$R_1 = \rho \cdot \frac{l_1}{S_1} \quad [\Omega] \quad (3.10.1.6)$$

$$R_2 = \rho \cdot \frac{l_2}{S_2} \quad [\Omega] \quad (3.10.1.7)$$

$$S_1 = \frac{I_1}{\sigma} \quad [\text{mm}^2] \quad (3.10.1.8)$$

$$S_2 = \frac{I_2}{\sigma} \quad [\text{mm}^2] \quad (3.10.1.9)$$

kde  $I_1$  – proud primárního vinutí

$I_2$  – proud sekundárního vinutí

$\sigma$  – proudová hustota [ $\text{A/mm}^2$ ]

*Ekvivalentní odpor*

$$R_{ekv} = R_1 + R_2 \cdot \left( \frac{U_1}{U_2} \right)^2 \quad [\Omega] \quad (3.10.1.10)$$

*Ztráty ve vinutí transformátoru*

$$P_{cu} = R_{ekv} \cdot I_1^2 \quad [\text{W}] \quad (3.10.1.11)$$

*Stanovení příkonu*

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \quad [\text{VA}] \quad (3.10.1.12)$$

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} \quad [\text{VA}] \quad (3.10.1.13)$$

kde  $P_1$  – příkon transformátoru

$P_2$  – výkon transformátoru

$\eta$  – účinnost transformátoru (volíme 0,9 – 0,95 v závislosti na velikosti) [10]

### *Magnetická indukce a intenzita magnetického pole*

Intenzita magnetického pole  $H$

$$H = \frac{F_m}{l_{stř}} = \frac{N_1 \cdot I_1}{2 \cdot \pi \cdot r_{stř}} \quad [\text{A} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (3.10.1.14)$$

kde  $l_{stř}$  – délka střední siločáry

$$r_{stř} = \frac{r_o + r_i}{2} [\text{m}] - \text{poloměr střední siločáry}$$

Magnetická indukce  $B$

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H = \mu \cdot H \quad [\text{T}] \quad (3.10.1.15)$$

kde  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [\text{H} \cdot \text{m}^{-1}]$  – permeabilita vakua

$\mu_r = 1$  relativní permeabilita

$\mu$  – absolutní permeabilita

Magnetický tok  $\Phi$

$$\Phi = B \cdot S \quad [\text{Wb}] \quad (3.10.1.16)$$

Kde  $B$  – magnetická indukce [T]

$S$  – průřez jádra [ $\text{m}^2$ ]

Indukčnost  $L$

$$L = \frac{N \cdot \Phi}{I} = \frac{\Phi_c}{I} \quad [\text{H}] \quad (3.10.1.17)$$

## 4. Magnetické vlastnosti látek

### 4.1 Anizotropie

Magnetická anizotropie je závislost magnetických vlastností feromagnetik na směru magnetování. Vektor magnetizace anizotropních materiálů má tendenci udržovat tzv. směr snadného magnetování, ve kterém má materiál nejlepší magnetické vlastnosti (izotropní materiály mají ve všech směrech magnetování stejné vlastnosti). energii nutnou k zmagnetování v určitém směru do nasyceného stavu můžeme nazvat energií anizotropie  $W_a$ :

$$W_a = \mu_0 M_s H_a = J_s H_a \quad [\text{J.m}^{-3}] \quad (4.1.1)$$

kde  $H_a$  je pole anizotropie. Velikost anizotropie je významná pro koercivitu, permeabilitu a pro energetickou náročnost magnetování. Indukci v nasycení neovlivňuje [2].

Druhy anizotropie:

- Magnetokrystalická* - obvykle dominantní, je však nízká u permalloyů s obsahem kolem 80% Ni a nulová u amorfních materiálů, které nemají krystalickou mřížku.
- Napěťová* - dočasně vyvolaná mechanickým napětím.
- Jednoosá indukovaná* - trvale vyvolaná žiháním v magnetickém poli nebo pod mechanickým napětím.
- Tvarová* - způsobena demagnetizací.
- Jednoosá, vícená* - podle počtu směrů snadné magnetizace [1].

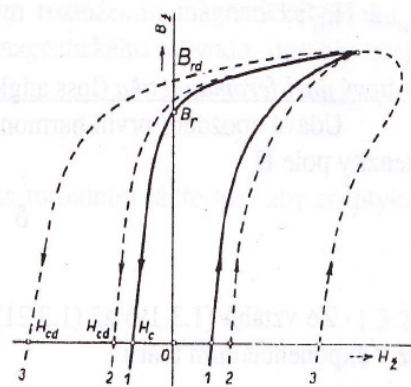
### 4.2 Magnetostrikce

Tento jev je u magneticky měkkých materiálů nežádoucí. Je příčinou akustických emisí a zvýšením ztrát v jádře. Lineární magnetostrikce orientovaných plechů je ve směru válcování snížena. Magnetostrikce je spojena s rotací magnetizace. Materiály, které mají anizotropii jsou magnetostrikční [1].

### 4.3 $B=f(H)$ charakteristika

#### 4.3.1 Amplitudová magnetizační charakteristika

Maximální hodnota indukce  $B$  v závislosti na maximální hodnotě intenzity magnetického pole  $H$ . Při nižších kmitočtech se přibližně shoduje s křivkou prvotního magnetování při stejnosměrném magnetování. U vyšších kmitočtů se výrazně liší díky povrchovému jevu (skinefekt – vytlačení střídavého magnetického toku k povrchu materiálu. Vzniká tím nerovnoměrné rozložení magnetického toku).



Obr. 4.1 Amplitudová magnetizační charakteristika [1]



### 4.3.2 Dynamická hysterezní smyčka

Vyjadřuje závislost okamžité hodnoty indukce  $B$  na intenzitě pole  $H$  při magnetovacím cyklu. S rostoucím kmitočtem se smyčka rozšiřuje (viz. Obr. 4.1). Příčinou rozšíření jsou ztráty vznikající vlivem vířivých proudů. Při vyšších kmitočtech se uplatní povrchový jev, mizí ostré hrany a smyčka se zaobljuje. Zvětšení plochy smyčky odpovídá ztrátám vznikajícím indukovanými vířivými proudy. Tvar dynamické hysterezní smyčky (hlavně její šířka) závisí značně nejen na kmitočtu, ale i na tvaru křivky průběhu indukce. Při měření dynamické hysterezní smyčky se proto musí dodržovat předepsaný průběh indukce a intenzity pole [1].

### 4.4 Ztráty při střídavém magnetování

Při magnetizačním cyklu (oběhu po uzavřené dynamické hysterezní smyčce) se ztrácí v objemu materiálu energie:

$$w = \oint H \cdot dB = S_{hd} = \int_0^T H(t) \frac{dB(t)}{dt} dt \quad (4.4.1)$$

kde $w$	měrná energie [ $J \cdot m^{-3}$ ]
$H, B$	souřadnice bodu dynamické smyčky odpovídající okamžitým hodnotám v čase $t$ [ $A \cdot m^{-1}$ ; T]
$S_{hd}$	plocha uzavřené dynamické smyčky [ $J \cdot m^{-1}$ ]
$T$	doba trvání magnetizačního cyklu [s]

#### 4.4.1 Rozdělení ztrát při střídavém magnetování

##### *Hysterezní ztráty*

Jsou dány plochou statické hysterezní smyčky  $S_{h0}$ , objemem feromagnetika  $V$  a frekvencí  $f$ :

$$P_h = V \cdot f \cdot S_{h0} \quad [W; m^3, Hz, J \cdot m^{-3}] \quad (4.4.1.1)$$

Při velmi pomalém oběhu jsou tyto ztráty zanedbatelné a plocha  $S_{h0}$  je dána pouze ztrátami hysterezními. Hysterezní ztráty jsou nezávislé na tvaru křivky, pokud tento průběh má jen jeden extrém (maximum nebo minimum) v každé půlperiodě, neboli když nenastává oběh po smyčce obsahující další malé hysterezní smyčky. Zpravidla je to vždy splněno.

##### *Ztráty vířivými proudy*

Jsou způsobeny vodivostí feromagnetika a dány přírůstkem plochy dynamické hysterezní smyčky  $S_{hd}$  proti ploše statické smyčky  $S_{h0}$  [2]:

$$P_v = P_z - P_h = V \cdot f (S_{hd} - S_{h0}) \quad [W; W; m^3, Hz, J \cdot m^{-3}] \quad (4.4.1.2)$$

Ztráty vířivými proudy rostou s kvadrátem frekvence a jsou značně závislé na tvaru křivky  $B_z=f(t)$ . Je zřejmé, že celkové ztráty jsou závislé na tvaru křivky.

Zanedbáme-li povrchový jev, pak pro ztráty vířivými proudy v plechu platí:

$$P_v = V_z \frac{4}{3\rho} (K_e \cdot f \cdot B_m d)^2 \quad [\text{W}] \quad (4.4.1.3)$$

kde  $V_z$  objem magnetovaného materiálu [ $\text{m}^3$ ]

$\rho$  měrný odpor materiálu [ $\Omega\text{m}$ ]

$K_e$  činitel tvaru křivky indukovaného napětí  $K_e = \frac{U_{ef}}{U_s}$  pro sinusový průběh

$K_e = 1,11$

$f$  frekvence [ $\text{Hz}$ ]

$B_m$  maximální hodnota indukce [ $\text{T}$ ]

$d$  průřez plechu [ $\text{m}$ ]

Ze vztahu je zřejmé, že ztráty vířivými proudy jsou úměrné druhé mocnině činitele tvaru  $K_e$ . Tím je dána závislost ztrát na tvaru křivky [2].

#### Anomální ztráty

Jsou způsobeny vířivými proudy a pohybem doménových stěn [1]. Frekvenční závislost anomálních ztrát je dána vztahem:

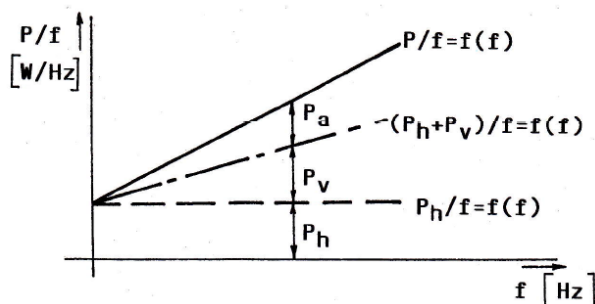
$$P_a = k \cdot f^2 \quad [\text{W}] \quad (4.4.1.4)$$

Obecně jsou složky ztrát různě závislé na kmitočtu a lze tedy psát:

$$P_z = P_h + P_v = k_1 f + k_2 f^2 \quad [\text{W}] \quad (4.4.1.5)$$

Hysterezní ztráty lze snížit zmenšením koercivity  $H_c$  a tím i plochy statické smyčky  $S_{h0}$ . Ztráty vířivými proudy použitím materiálu s vyšší rezistivitou, nebo zmenšením indukovaného napětí. Anomální ztráty snížíme zjemňováním doménové struktury.

Magnetické vlastnosti jsou dány pohybem elektronu kolem jádra atomu, který tím získá magnetický moment – podobně jako závit s elektrickým proudem. Elektron má ještě další moment daný rotací kolem své vlastní osy – spinem.



Obr. 4.2 Frekvenční závislost ztrát [1]

## 4.5 Diamagnetismus

Magnetické momenty atomů těchto látek jsou v nulovém magnetickém poli nulové, nebo se v rámci molekuly navzájem vruší. Po vložení do magnetického pole se v atomech indukuje magnetický moment, který působí proti vnějšímu poli – zeslabuje ho. Susceptibilita diamagnetických látek je tedy záporná [4], [8].

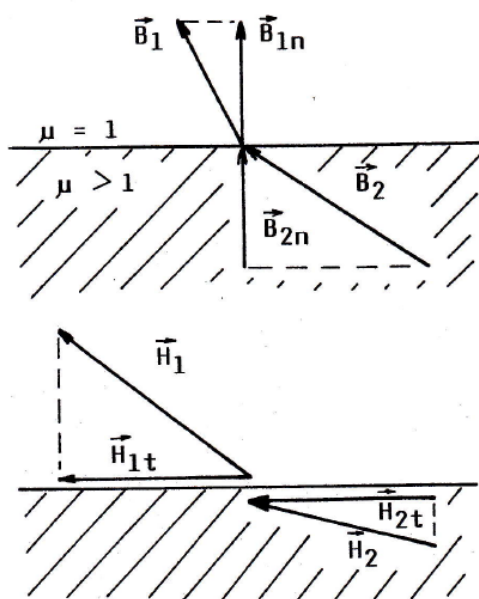
*Diamagnetické látky* – některé kovy – Cu, Ag, Au  
nekovové prvky – Si, P, S  
mnoho organických sloučenin

## 4.6 Paramagnetismus

Atomy mají i v nepřítomnosti magnetického pole magnetický moment, neexistují však u nich výměnné síly způsobující feromagnetismus. Susceptibilita je kladná, v nehomogenním poli jsou tělíska z paramagnetik vtahována do míst s vyšší intenzitou magnetického pole. V homogenním poli mají tendenci natočit se do směru působení magnetického pole a mírně jej zesílit. Po vyjmutí z magnetického pole, nezůstává žádná remanence.

*Paramagnetické látky* – slabá –  $O_2$ , NO, vzduch  
silná – přechodové prvky (Cr, Mn, Pd, Pt)

## 4.7 Feromagnetismus



Obr. 3.3 Normálové a tečné složky [1]

Feromagnetismus je způsoben uspořádáním magnetických momentů prostřednictvím výměnných sil. Uvnitř Weissovy domény (též Weissova oblast – oblast mikrokystalů ve feromagnetických látkách, která se skládá ze značného počtu atomů nebo molekul, jejichž magnetické momenty jsou uspořádány rovnoběžně a které tak tvoří elementární magnetický dipól), je látka ve stavu magnetického nasycení i bez působení vnějšího pole. Celý objem feromagnetika je tvořen těmito doménami. Jednotlivé domény mají v základním (v nezmagnetovaném) stavu různé směry, takže látka se podobá svými vlastnostmi látce

paramagnetické. Působí-li na feromagnetickou látku vnější pole, dochází k posuvu tzv. Blochových stěn ve prospěch silnějších domén ve směru působícího vnějšího pole (vratná změna). Zvýšením intenzity pole dojde k tzv. Barkhausenově skoku, což způsobí změnu polohy stěny do nové. Tato změna je nevratná. V oblasti nasycení už nedochází k posuvu stěn, ale pouze k natočení magnetizace do směru působícího pole. Feromagnetismus se vyskytuje u krystalických i amorfních pevných látek [1].

#### 4.7.1 Feromagnetikum v magnetickém poli

Vložení feromagnetického materiálu do magnetického pole ve vzduchu dojde ke změně rozložení pole a jeho intenzity  $H$  i indukce  $B$ . Na rozhraní dvou permeabilit platí, že normálové složky indukce a tečné složky intenzity pole musí být stejné (viz. Obr. 3.3) [1]:

$$B_{1n} = B_{2n}; H_{1t} = H_{2t} \quad (4.7.1.1; 4.7.1.2)$$

#### 4.7.2 Feromagnetické materiály

V dnešní době jsou známy (za pokojové teploty) čtyři feromagnetické prvky: Fe, Co, Ni, Gd, jejich slitin, u Heuslerových slitin (např.  $\text{Cu}_2\text{MnAl}$ ) a u feritů – nekovových sloučenin železa příbuzných magnetovci ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). V těchto látkách je možné i slabým magnetickým polem vyvolat silnou magnetizaci, která nezmizí ani po vyjmutí látky z magnetického pole[4].

Feromagnetické prvky se vyznačují permeabilitou  $\mu \gg 1$ , která podstatně závisí na:

*Teplotě* – vlastnosti feromagnetik jsou vázány na určitý rozsah teplot. S rostoucí teplotou feromagnetismus zaniká. Kritická je tzv. Curieova teplota  $T_C$ , nad kterou se prvek stává paramagnetickým.

*Magnetické historii* – podstatný vliv na permeabilitu mají předchozí magnetizační děje. Magnetický stav feromagnetika je tedy podmíněn předchozím stavem. S tímto souvisí jevy magnetické hystereze.

*Intenzitě pole*

#### 4.7.3 Střídavé magnetování

Proces, při kterém má intenzita a indukce periodický průběh bez stejnosměrné složky (pokud by se vyskytla stejnosměrná složka – střídavé magnetování se stejnosměrnou složkou). Při střídavém magnetování materiálu se v něm indukují vířivé proudy, které způsobují povrchový jev (skinefekt). Tento jev má za následek vytlačení magnetického toku k povrchu materiálu a změnu indukce v jednotlivých místech průřezu [2].

Hloubka vniku – hloubka vniku pod povrchem, kde indukce klesne oproti povrchu  $e$ -krát. Pro silné plechy s konstantní permeabilitou a harmonickým průběhem lze psát

$$s = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_r \mu_0}} \quad (4.7.3.1)$$

Pro slabé plechy určené k prvotnímu magnetování lze stanovit mezní kmitočet, při kterém se hloubka vniku rovná polovině tloušťky plechu

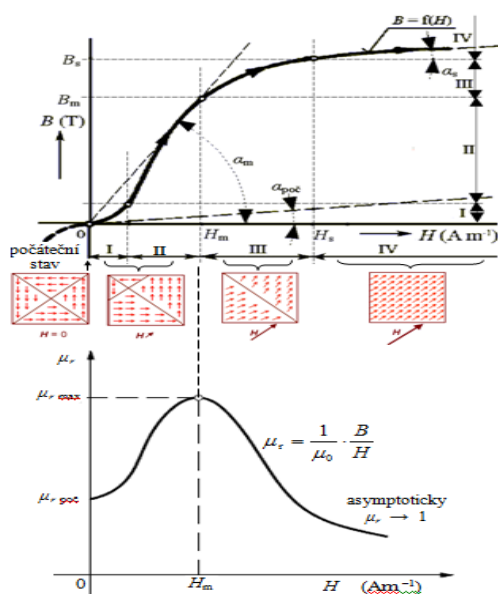
$$f_{mez} = \frac{4\rho}{\pi \mu_r \mu_0 d^2} \quad (4.7.3.2)$$

Po překročení mezního kmitočtu se zdánlivá permeabilita rychle zmenšuje. Materiály s velkou permeabilitou se musí používat jen jako tenké plechy.

#### 4.7.4 Prvotní magnetování fero-ferimagnetika

Vycházíme ze stavu, že látka nebyla od zhotovení dosud zmagnetována, nebo je po dokonalé demagnetizaci látky. Prvotní magnetizace probíhá po křivce prvotní magnetizace  $B=f(H)$ , tzv. panenská křivka. Magnetování provádíme zvyšováním intenzity vnějšího pole od 0 až do maxima, tj. do nasycení, kdy se materiál začne chovat jako paramagnetikum s relativní permeabilitou  $\mu_r=1$ .

**I – počáteční oblast** - probíhají vratné změny doménových stěn.



Obr. 4.4 Křivka prvotního magnetování [21]

**II – strmá oblast** – nevratné stáčení magnetických momentů v doménách do směru vnějšího pole a skokové změny orientace v malých doménách → Barkhausenův jev

**III – horní koleno** – proces přemagnetování dokončen

**IV – nasycení** – celková magnetizace je orientovaná do směru vnějšího pole, při dalším zvyšování intenzity roste indukce lineárně s relativní permeabilitou  $\mu_r = 1$ .

**Relativní permeabilita  $\mu_r$**

Závislá na intenzitě magnetického pole  $\mu_c = \mu_r(H)$  [21].

Obecně lze zapsat ve tvaru:

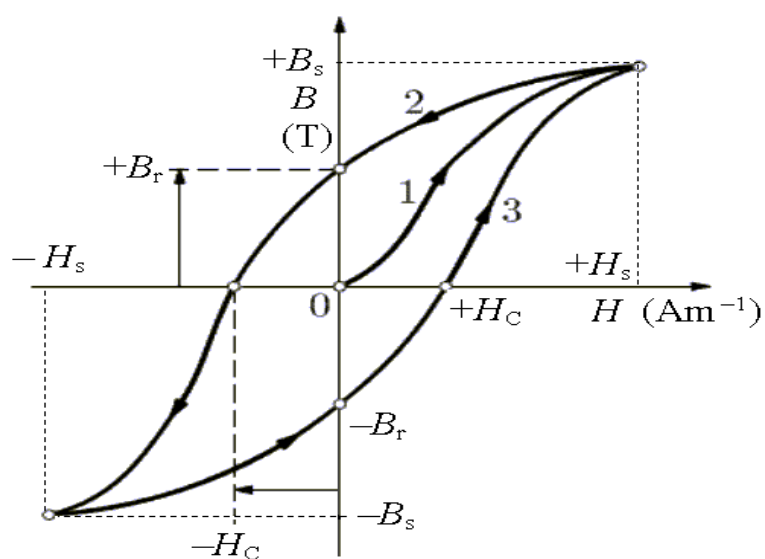
$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B}{H} \quad [ - ; \text{H.m}^{-1}, \text{T}, \text{A.m}^{-1} ] \quad (4.7.4.1)$$

#### 4.7.5 Hysterezní smyčka – proces přemagnetování fero-, ferimagnetických látek

Snížování intenzity vnějšího magnetického pole z nasycené hodnoty  $H_s$  zpátky do nulové a poté do záporných hodnot se nevrací po téže křivce, ale probíhá po křivce posunutě doleva. Totéž se projeví při opětovném zvyšování intenzity magnetického pole ze záporné nasycené hodnoty  $-H_s$  opět do kladné nasycené hodnoty  $H_s$ , tentokrát bude křivka posunuta doprava od prvotní magnetizace. Vznikne tedy hysterezní křivka charakterizující daný feromagnetický nebo ferimagnetický materiál. Hystereze je způsobena nevratným (ztrátovým) dodáváním energie na přemagnetování materiálu, tedy na přetočení všech magnetických spinových momentů v materiálu. Plocha hysterezní smyčky tedy představuje hysterezní ztráty tj. energii vynaloženou na přetáčení magnetických dipólů.

### Hysterezní křivka fero-, ferimagnetického materiálu

1. krok – prvotní magnetizace  
intenzita vnějšího magnetického pole  $H$  se zvyšuje  
z 0 do  $+H_s$   
křivka prvotní magnetizace 1
2. krok – přemagnetování  
intenzita vnějšího magnetického pole  $H$  se snižuje  
z  $+H_s$  do  $-H_s$   
větev 2 hysterezní smyčky
3. krok – opětovné přemagnetování  
intenzita vnějšího magnetického pole  $H$  se zvyšuje  
z  $-H_s$  do  $+H_s$  - větev 3 hysterezní smyčky



Obr. 4.5 Hysterezní křivka [21]

## 5. Materiály používané k výrobě magnetických obvodů

### 5.1 Magneticky měkké materiály

A	Železo		
B	Nízkouhlíkaté oceli		
C	Křemíkové oceli	C1 Masivní materiály C2 ploché materiály	C21 izotropní C22 anizotropní C23 tenké
D	Ostatní oceli		
E	Slitiny Ni-Fe	E1 72-83 Ni E2 54-68 Ni E3 45-50 Ni E4 35-40 Ni E5 cca 30 Ni	
F	Slitiny Fe-Co	F1 47-50 Co F2 35 Co F3 23-27 Co	
G	Ostatní slitiny	G1 Al-Fe G2 Al-Si-Fe	
H	Magneticky měkká keramika		

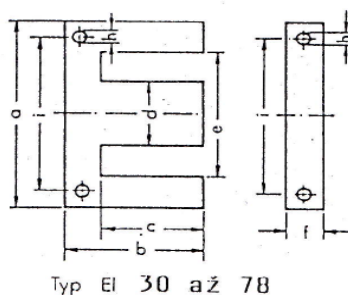
Tab. 5.1 Magneticky měkké materiály dle IEC [1]

#### 5.1.1 Křemíkové oceli

Nejčastěji používané materiály pro jádra střídavě magnetovaných obvodů (např. transformátory). Přidáním křemíku (1 – 3,5 %) se sníží koercivita  $H_c$  (vyjadřuje odolnost proti odmagnetování vzorku) a zvýší se elektrický odpor, což má za následek snížení ztrát v jádře.

*Neorientované plechy (za tepla válcované)*

Mají izotropní strukturu. Jsou vhodné pro magnetické obvody točivých strojů, u kterých se mění směr pole. Dodávají se ve formě výseků (trafo plechy) např. tvaru EI (Obr. ) Tloušťky těchto plechů jsou definovány normami DIN 41 302 a IEC 740.



Obr. 5.1 Plechy tvaru EI [1]

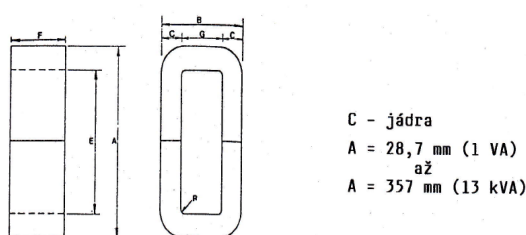
### *Orientované plechy (válcované za studena)*

Označují se taky GOSS (Grain Oriented Silicon Steel) – krystalová zrna jsou orientovaná tak, že osa snadné magnetizace leží ve směru válcování. Přemagnetování materiál se provádí pohybem doménových stěn na dlouhé vzdálenosti.

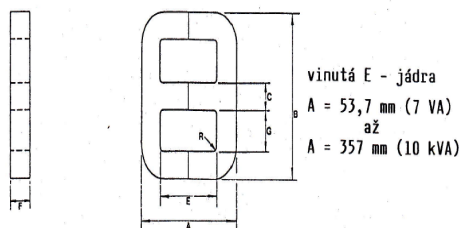
Výroba se skládá z válcování za tepla, opakovaného válcování za studena a rekrytalizačního žíhání (ohřev za studena tvářené oceli na teplotu rekrytalizace, danou stupněm tváření, setrvání na této teplotě a ochlazování [10]). Velikost krystalických zrn se volí podle požadavků na nízké hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy. Orientované plechy mají o dost lepší magnetické vlastnosti ve směru válcování.

Nejčastější využití mají u magnetických obvodů transformátorů, které však nelze skládat z výseků klasického typu. Velké transformátory se musí vyrábět skládáním obdélníkových plechů s tím, že směr magnetického toku musí být stejný jako směr válcování. U malých transformátorů se magnetický obvod vyrábí navinutím jádra. Pás je navinut na trn, závity jsou slepeny a jádro rozříznuto. Po nasunutí cívek jsou poloviny jádra stáhnuty páskou.

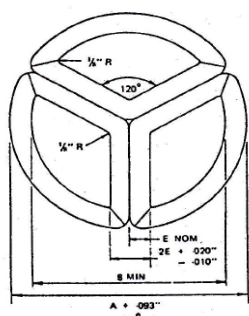
Materiál je vhodný pro konstrukci toroidních transformátorů a to především tam, kde rozhoduje malá hmotnost a nízké rozptylové pole. Plechy se dodávají v tloušťkách od 0,1 mm (pro vyšší frekvence i 0,05 mm). C-jádra a dva typy vinutých E-jader (viz Obr. 5.2, 5.3, 5.4).



Obr. 5.2 C – jádra [1]



Obr. 5.3 Vinutá E – jádra [1]



Obr. 5.4 Kruhová E – jádra [1]



### 5.1.2 Permalloye

Krystalické slitiny železa, niklu, případně dalších přísad. Jsou označovány podle obsahu niklu (např. PY36 obsahuje 36 % niklu). Materiály dosahují vysoké permeability a nízké koercivity. Nevýhodou je nízká indukce v nasycení  $B_s$  a nutnost tepelného zpracování, po kterém už materiál nesmí být mechanicky namáhán. Tvar hysterezní smyčky permalloyů lze měnit žíháním v magnetickém poli. Vyrábí se ve formě vinutých toroidů nebo výseků standardních tvarů. Vyrábějí se plechy o tloušťkách od 0,05mm [1].

### 5.1.3 Amorfni a nanokrystalické materiály

Amorfni materiály tzv. magnetická skla mají výhodu v absenci magnetokrystalické anizotropie, nemají totiž krystalovou mřížku. Vyrábí se metodou rychlého ochlazování (ochlazení proběhne za 1- 2 ms což způsobí zamezení růstu krystalického zrna). Tavenina se vstříkuje na rotující chlazený válec. Tímto postupem lze vyrobit plechy o tloušťce 0,02 a šířce do 500 mm [1].

Amorfni materiály mají velký elektrický odpor, velkou pevnost, vysokou odolnost proti mechanickému namáhání a korozi. Jsou použitelné do poloviny Curieho teploty. Při vyšší teplotě dochází ke krystalizaci a ke ztrátě vlastností materiálu. Využívají se pro své vlastnosti k výrobě například silových transformátorů, díky své vysoké indukci v nasycení jsou vhodným materiálem pro výrobu jader tlumivek s přemagnetováním nebo jako materiály pro magnetické hlavy. Amorfni materiály se dělí do tří skupin:

#### *Amorfni materiály na bázi Fe*

Mají vysokou hodnotu indukce v nasycení  $B_s$ , obsahují levné suroviny – Fe, Si, B a C. Pro své nízké ztráty se využívají k výrobě jader distribučních a silových transformátorů, tj. pro zařízení kde je kladen důraz na vysokou permeabilitu při nízkých ztrátách a cenách. Amorfni jádro je oproti jádru z elektroplechů větší.

#### *Amorfni materiály na bázi Fe-Ni*

Mají vyšší hodnoty permeability než železné materiály a při ceně nižší, než slitiny obsahující kobalt. Nevýhodou poměrně malá hodnota indukce v nasycení.

#### *Amorfni materiály na bázi Co*

Ze skupiny nejdražší materiály, ale mají nejnižší koercivitu a malé hodnoty magnetostrikce. Možnost mechanického namáhání bez trvalé degradace magnetických vlastností. Vzhledem ke svým výborným magnetickým vlastnostem se tyto materiály používají pro stavbu výkonové elektroniky.

### 5.1.4 Nanokrystalické materiály

Jedná se o velmi jemné krystaly (nanokrystaly) feromagnetického kovu oddělené tenkou amorfni maticí. Získávají se především řízenou krystalizací kovových skel vhodného chemického složení. Vynikající magneticky měkké vlastnosti těchto materiálů jsou způsobeny náhodnou orientací a malou velikostí nanokrystalických zrn spolu se silnou výměnnou interakcí

mezi zrný. Byly zkoumány magnetické a magnetoelastické vlastnosti nanokrystalických slitin FeNbCuSiB, FeNbB a FeCoNbB.

### 5.1.5 Magneticky měkké ferity

Jsou keramické sloučeniny kyslíčnicků železa a dalších prvků (Mn, Li, Zn) se strukturou odvozenou od struktury magnetovce (spinelovou). Pro dosažení optimálních vlastností jako je vysoký měrný odpor, mohou být přimíchány i další prvky. Magneticky měkké ferity mají obecné složení  $MO \cdot Fe_2O_3$ , kde M je některý z výše uvedených prvků. Vyrábějí se slinováním slisovaného prášku. Díky vysokému měrnému odporu lze tyto materiály použít i pro vysokofrekvenční aplikace. Ferity dělíme do dvou skupin:

#### *Mn-Zn ferity*

Mají vysokou hodnotu permeability, měrný odpor  $10^4 \Omega m$ . Používají se v aplikacích pracujících s frekvencí do 1 MHz. Některé ferity této skupiny mají nízkou Curieho teplotu, proto nejsou vhodné pro použití ve výkonových aplikacích.

#### *Ni-Zn ferity*

Měrný odpor řádu  $10^5 \Omega m$ . Používané pro zařízení pracující s frekvencí do 200 MHz. Dosahují nižších hodnot permeability.

*Celá problematika je podrobněji rozebrána v [1].*

## 6. Magnetická měření

### 6.1 Magnetické senzory

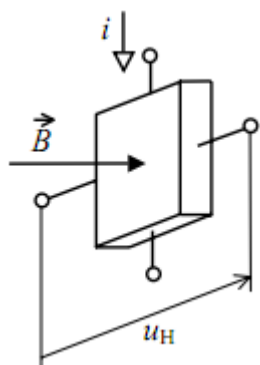
	fT	pT	nT	μT	mT	T
Měřicí cívka						
Fluxgate (feromag. sonda)						
Rezonanční						
SQUID						
Hallova sonda						
AMR magnetorezistor						

Obr. 6.1 Citlivost magnetických senzorů [1]

Magnetické senzory zaznamenávají změny v magnetickém poli a vyvozují pro ně informace a vlastnosti jako je směr, přítomnost, rotace, úhel nebo elektrický proud. Výstupní signál z těchto senzorů vyžaduje, aby byl zpracován pro překlad do požadovaných parametrů. Ačkoli magnetické senzory poskytují přesná a spolehlivá data bez fyzického kontaktu.

#### 6.1.1 Sensory s Hallovou sondou

Hallové senzory se používají pro měření indukce od 1 mT do 1 T, pro kmitočty do 30 kHz. Tyto senzory jsou založeny na principu působení magnetického pole na nosiče proudu v polovodiči – Hallův jev.



B indukce měřeného

Hallovo napětí

$$u_H = R_H \cdot \frac{I}{d} \cdot B \text{ [V]} \quad (6.1.1.1)$$

kde **d** je tloušťka vzorku [m]  
**R<sub>H</sub>** Hallova konstanta [ $\Omega \cdot \text{m} \cdot \text{T}^{-1}$ ]  
**I** pomocný proud [A]

Obr. 6.2 Princip Hallova jevu [9] pole [T]

## Hallův jev

Když v polovodičové destičce nebo vrstvě vytvoříme elektrické pole intenzity  $E$ , volné nosiče náboje se budou pohybovat ve směru elektrického pole (díry souhlasně, elektrony v protisměru). Mezi kontakty na čelech destičky vznikne elektrický proud  $I$ . Jestliže na nosiče bude současně působit také magnetické pole  $B$ , nosiče se budou působením Lorentzovy síly vychylovat ve směru kolmém na směr pohybu. Výsledkem je vznik příčného elektrického pole  $E_H$  a potenciálového rozdílu  $U_H$  na protilehlých plochách, kolmých na směr pole  $E_H$ .

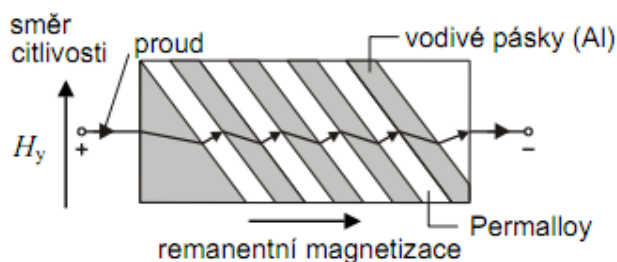
Typ	Výrobce	chyba	Zobrazení	Rozlišení	Rozsahy	Poznámka
Elimag MP-1	Elidis s.r.o.	1% rozsahu	Graf. display	-	10 - 2000 mT	RS 232
Elimag F1	Elidis s.r.o.	max 2,5% rozsahu	3 a 1/2 display	0,001 A/cm	+ - 1,999 A/cm	teplotní posun zanedbatelný
8010	F.W. BELL	-	TFT – Disp.	0,1 nT - 0,1 mT	30 $\mu$ T, 30 T	DC - 250 Hz, AC - 20 - 50 kHz

Tab. 6.1 Magnetometry s Hallovou sondou[12], [23]

### 6.1.2 Anizotropní magnetorezistor (AMR)

AMR senzory jsou vhodné pro měření lineární, úhlové pozice a posunutí v magnetickém poli Země. Tyto zařízení jsou vyrobeny z niklu a železa (Permalloy), uloženy na tenkém filmu na křemíkovém waferu a vzorkovány jako odporový pruh. Vlastnosti filmu jsou příčinou změny rezistivity 2 % - 3 % v přítomném magnetickém poli. Šířka pásma je obvykle 1-5MHz rozsahu. Odezva magnetorezistivního efektu je velmi rychlá a nezávislá na cívce a na oscilační frekvenci.

Princip magnetorezistoru - vodivost feromagnetika ve směru magnetizace je menší než ve směru kolmém. tzv. „barber pole“ struktura vede k linearizaci a možnosti rozlišení směru.



Obr. 6.3 Princip AMR [9]

### 6.1.3 Fluxgate (Feromagnetická sonda)

Sonda je tvořena dvěma cívkami, primární a sekundární, navinutými kolem běžného feromagnetického jádra s vysokou permeabilitou. Indukce jádra se mění za přítomnosti vnějšího magnetického pole. Řídicí signál aplikovaný na primární vinutí o frekvenci  $f$  je příčinou oscilace jádra mezi body saturace. Signál sekundárního vinutí výstupu je svádán skrz jádro s primární cívkou. Signál je ovlivněn změnou permeability v jádře a projevuje se změnou amplitudy při snímání na výstupní cívce. Signál může být namodulován fázovým detektorem a po filtrování můžeme získat hodnotu magnetického pole[1].

Dobře navržený fluxgate magnetometr může detekovat signál v rozsahu desítek  $\mu\text{T}$ , měřit velikost, i směr magnetického pole. Fluxgate sonda je schopna pracovat s frekvencí v kHz.

Typ	Výrobce	Chyba	Zobrazení	Rozlišení	Rozsahy	Poznámka
MAG 01	Bartington	+/- 0,25% rozsahu	4 a 1/2 display	1 nT	0,2 mT, 2 mT	rozsah závisí na sondě
TFM100-G2	MEDA	0,5% rozsahu	-	-	+/-100 $\mu\text{T}$ /+/- 10 V	citlivost 100 $\mu\text{V/nT}$

Tab. 6.2 Magnetometry s Fluxgate sondou[20],[21]

### 6.1.4 Měřicí cívka

Princip měřicí cívky je založen na Faradayově indukčním zákonu:

$$u_i = \frac{d\Phi_L}{dt} = N \frac{d}{dt} (S\mu\mu_0 H_0) \quad [\text{V}] \quad (6.1.4.1)$$

kde  $u_i$  je indukované napětí [V]

$\Phi_L$  cívkový tok [Wb]

$S$  střední plocha cívky [ $\text{m}^2$ ]

$N$  počet závitů snímacího vinutí

$\mu$  permeabilita prostředí

$H_0$  intenzita snímaného pole [A/m]

Znázorněnou derivaci lze přepsat do vztahu (52) a získat tak základní vztahy pro jednotlivé typy sond:

$$u_i = NS\mu_0\mu \frac{d}{dt} H_0 + N\mu_0\mu H_0 \frac{d}{dt} S + NSH_0\mu_0 \frac{d}{dt} \mu \quad (6.1.4.2)$$

*Indukční cívka*

*Rotační cívka*

*Fluxgate sonda*

*Vzduchová cívka*

Citlivost indukčních sond závisí na frekvenci  $f$ , počtu závitů  $N$  a na ploše cívky  $S_c$ . Plocha cívky je často omezena konstrukčními požadavky. Nejčastějším typem cívek jsou vícevrstvé válcové cívky. Tyto cívky jsou schopné měřit v nehomogenním poli průměrnou hodnotu

magnetické indukce. Dalším často používaným typem je aproximace kulové cívky – soustava několika válcových cívek.

#### *Cívka s jádrem*

Feromagnetického jádra se používá pro zvýšení citlivosti sond. Použití jádra však zvyšuje riziko nelinearit.

Typ	Výrobce	kmitočtový rozsah	přesnost
MGCH 2	MEDA	10 - 100 kHz	0,1 db/10 kHz
MGC 3	MEDA	0,2 - 1 kHz	+/- 0,5 %/30 Hz

*Tab. 6.3 Sondy s feromagnetickým jádrem [21]*

### **6.1.5 Rezonanční teslametry**

Tyto přístroje jsou z principu skalárního typu: výstup závisí pouze na velikosti měřeného pole. Směr pole lze určit nepřímými metodami, obvykle se však k tomu používá čidel pracujících na jiném principu [1].

### **6.1.6 Magnetooptické senzory**

Senzory využívající techniky optických vláken jsou založeny na magnetostrikčním jevu: prodloužení optického vlákna pokrytého napařenou vrstvou magnetického materiálu. Tyto senzory pracují s citlivostí 1 nT a jsou citlivé na změnu teploty a otřesy. Nejsou v praxi příliš rozšířeny [1].

### **6.1.7 Supravodivé magnetometry**

Magnetometr měří magnetické pole snímací anténou – supravodivou cívkou o ploše několika cm<sup>2</sup>. Jsou schopny měřit v rozsahu od 10 fT – 10 nT. Využití jako radiometr se soustavou rozdílových cívek. Nevýhodou je potřeba kapalného Helia. Používají se často při měření slabě magnetických látek a při měření biomagnetických polí [1].

## 7. Experimentální část

---

### 7.1 Cíl měření

Jak bylo uvedeno v úvodu a v zadání, cílem vlastní experimentální části práce bylo zjištění rozložení magnetického pole v okolí typových toroidních jader transformátorů. Rozhodujícím faktorem bylo magnetické pole přecházející nad jádrem, respektující magnetický tok, který se uzavírá mezi závity magnetického obvodu. Pro analýzu bylo zvoleno toroidní jádro firmy NT Magnetics Plzeň. Měření a analýzy byly rozděleny do následujících kategorií:

- Měření č. 1 - Zjišťování rozložení magnetické indukce ve třech výškových úrovních
- Měření č. 2 - Zjišťování rozložení magnetické indukce na poloměru střední siločáry
- Měření č. 3 - Měření magnetické indukce ve středu jádra v ose Z v závislosti na napětí

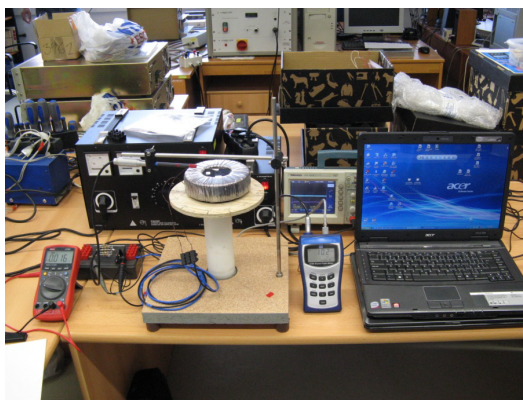
Popis jednotlivých měření a dosažených výsledků je uveden v příslušných kapitolách.

### 7.2 Postup měření

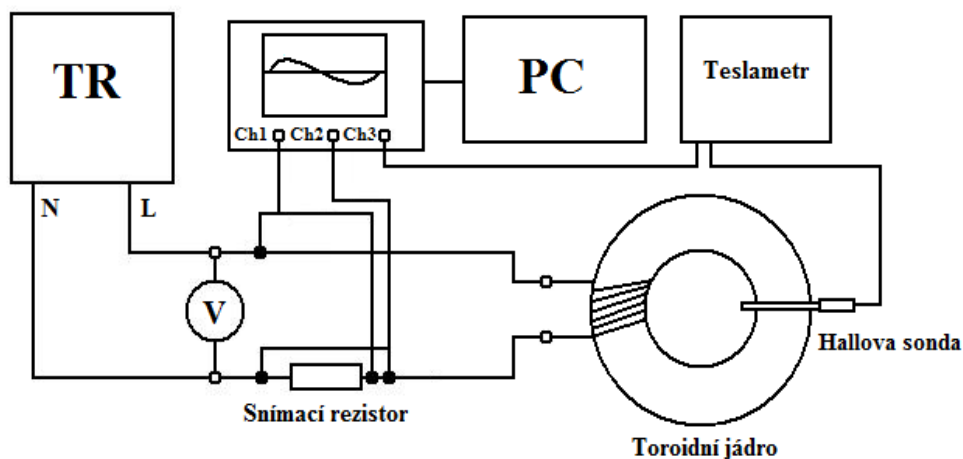
- Návrh měřicího pracoviště
- Výroba otočného nosiče transformátoru
- Příprava osciloskopického záznamu
- Vlastní měření
- Shrnutí a vyhodnocení výsledků

### 7.3 Měřicí soustava

Na následujících obrázcích je zobrazena měřicí soustava a blokové uspořádání měřicí soustavy. Pro napájení měřeného prvku byl zvolen autotransformátor s nastavitelnou velikostí výstupního napětí. Pro kontrolu hodnoty výstupního napětí je na svorky napájecího transformátoru připojen Voltmetr. Toroidní transformátor je umístěn na otočném nosiči, který byl k tomuto účelu navržen a zkonstruován. K měření velikosti magnetické indukce byl použit Teslametr, značky F. W. BELL s axiální sondou. K záznamu průběhů byl proveden pomocí osciloskopu Tektronix TDS2024 s komunikačním rozhraním a softwarem Wavestar pro komunikaci s PC a ukládání průběhů. Zapojení soustavy je patrné z blokového schématu. Podrobnější popis jednotlivých prvků soustavy je v následující kapitole.



Obr. 7.3.1 Měřicí soustava



Obr. 7.3.2 Blokové schéma soustavy

## 7.4 Použité měřicí přístroje

*Teslametr F. W. BELL 5180*

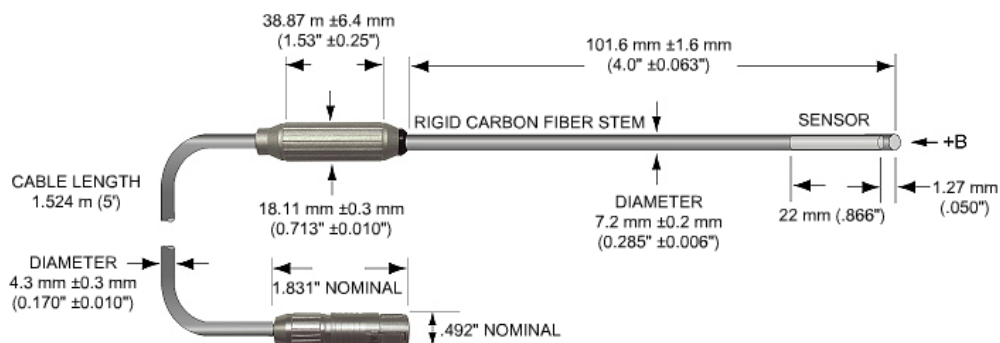


Obr. 7.4.1 F. W. BELL 5180

F. W. BELL 5180 je přenosné zařízení k měření intenzity magnetického pole  $H$  [ $A \cdot m^{-1}$ ] nebo magnetické indukce  $B$  [G, T]. Měřicí rozsah přístroje je od 0,01 mT do 3 T. Je schopný měřit jak stejnosměrné (DC), tak střídavé (AC) magnetické pole, respektive jeho efektivní hodnotu. Frekvenční rozsah je do 30 kHz.



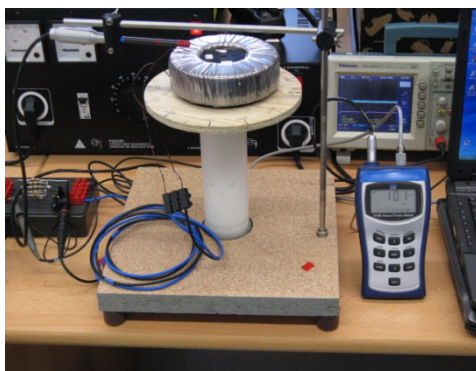
### Axiální sonda s Hallovým senzorem



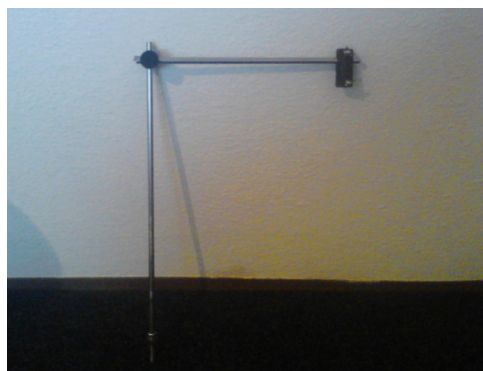
Obr. 7.4.2 Axiální Hallova sonda

### Otočný nosič transformátoru

Měřicí přípravek byl zhotoven jako pomůcka pro měření magnetického pole v okolí toroidního jádra. Při konstrukci byly použity nemagnetické materiály jako dřevo, silon, pryž a nerezová ocel (vyjma axiálního ložiska), aby se omezilo rušení sondy. Základnu pomůcky tvoří dřevotřísková deska, která je postavená na čtyřech pryžových nohách. V základně je vyfrézováno sedlo axiálního ložiska. Ložisko je nalisované na silonový válec, tvořící nosný prvek pro kotouč, který je vyřezaný ze stavební překližky.



Obr. 7.4.3 Přípravek k měření



Obr. 7.4.5 Rameno držáku sondy

Rameno pro uchycení Hallovy sondy je vyrobeno z nerezové oceli. Abychom mohli měnit výšku a poloměr polohy sondy, bylo nutné vyrobit dva držáky, které tento pohyb umožňují. Držáky jsou tvořeny dřevěnými válečky s vyvrtanými dírami o průměru dvakrát 8 mm na prvním a 8 a 13 mm na druhém válečku.

## **Parametry dalších použitých přístrojů**

### *Autotransformátor*

Výrobce: DIAMETRAL

Typ: RA1F 250. 100

Výrobní číslo: 107

Parametry výstupu: AC 5 – 250 V / 10 A

### *Oddělovací transformátor*

Výrobce: DIAMETRAL

Typ: OT 230. 030

Výrobní číslo: 70

Parametry výstupu: 230 V / 3 A / 50 Hz

### *Osciloskop*

Výrobce: Tektronix

Typ: TDS 2024

Výrobní číslo: C032297

### *Virtuální osciloskop WaveStar*

### *Toroidní jádro*

Výrobce: NT Magnetics Plzeň

Lakovaný 30

CUP 3

Vnější průměr jádra: 121 mm

Vnitřní průměr jádra: 70 mm

Vnější průměr jádra s vinutím: 139 mm

Vnitřní průměr jádra s vinutím: 59 mm

### *Voltmetr*

Výrobce: Uni – T

Typ: 60 E

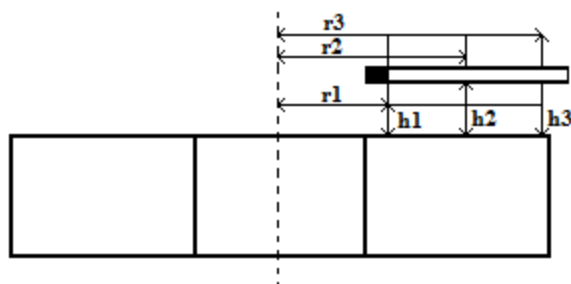
Výrobní číslo: 1100167435

### *Snímací rezistor*

Velikost odporu  $R = 1 \Omega$

## 7.5 Měření č. 1

V první úloze byly stanoveny tři výškové úrovně  $h_1 = 0,5$  cm,  $h_2 = 1$  cm a  $h_3 = 1,5$  cm. Každá z těchto zvolených úrovní obsahovala tři poloměry pro umístění sondy, ve kterých proběhlo zjišťování rozložení magnetického pole. Transformátor pracoval bez zatížení a byl napájen síťovým napětím. Po nastavení první úrovně a prvního poloměru byly odečítány hodnoty stejnosměrné složky magnetické indukce v okolí transformátoru. Toto odečítání bylo realizováno natáčením transformátoru umístěného na měřicím přípravku s krokem  $15^\circ$ . Změřené hodnoty byly zapsány do připravených tabulek. Pro každý krok byl zobrazen a uložen průběh na virtuálním osciloskopu. Měření v dalších poloměrech a úrovních proběhlo stejným způsobem.



Obr. 7.5 Naznačení měřených pozic

### 7.5.1 Naměřené hodnoty

Úhel[°]	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
B[μT]	6,9	7,1	6,9	7	7,2	7,4	7,45	7,7	7,9	8,4	8,6	8,7
Úhel[°]	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345
B[μT]	8,8	9,2	9,3	8,9	8,7	8,4	8,2	8,1	7,8	7,7	7,5	7,8

Tab. 7.5.1 Naměřené hodnoty v  $h = 0,5$  cm a  $r = 1$  cm

Úhel[°]	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
B[μT]	11	10,1	9,7	8,7	8,2	4,3	4,2	3,9	4	4,2	4,6	4,6
Úhel[°]	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345
B[μT]	5,2	5,7	4,5	3,8	4	3	2,4	2,4	8	8	7,9	8

Tab. 7.5.2 Naměřené hodnoty v  $h = 0,5$  cm a  $r = 5$  cm

Úhel[°]	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
B[μT]	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,7	11,9	11,8	11,8	11,9	11,9
Úhel[°]	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345
B[μT]	12	12,1	12,1	12,1	12,1	12,2	12	11,9	11,9	11,8	11,8	11,7

Tab. 7.5.3 Naměřené hodnoty v  $h = 0,5$  cm a  $r = 9$  cm

Úhel[°]	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
B[μT]	8,2	8,3	8,3	8,2	8,2	8,2	8,1	8,1	8	7,9	8	7,9
Úhel[°]	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345
B[μT]	7,9	8,2	8,2	8,1	8	8,1	8	8	8	8,2	8,3	8,2

Tab. 7.5.4 Naměřené hodnoty v  $h = 1$  cm a  $r = 1$  cm

Úhel[°]	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
B[μT]	10,9	11	11,2	10,8	10,8	10,8	10,8	10,7	11,2	11,1	11,1	11
Úhel[°]	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345
B[μT]	11	10,8	11	10,9	10,9	11	10,7	10,7	11	10,7	11	11

Tab. 7.5.5 Naměřené hodnoty v  $h = 1 \text{ cm}$  a  $r = 5 \text{ cm}$

Úhel[°]	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
B[μT]	17,5	17,6	17,8	18	18,1	18,3	18,3	18,3	18,3	18,2	18,1	18
Úhel[°]	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345
B[μT]	17,8	17,7	17,5	17,3	17,3	17,2	17,2	17,2	17,2	17,3	17,3	17,4

Tab. 7.5.6 Naměřené hodnoty v  $h = 1 \text{ cm}$  a  $r = 9 \text{ cm}$

Úhel[°]	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
B[μT]	8,3	8,3	8,1	8,1	8,2	8,2	8,1	8,1	7,9	7,9	8,1	8,1
Úhel[°]	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345
B[μT]	8,2	8,1	8,2	8,3	8,5	8,5	8,5	8,5	8,4	8,4	8,4	8,3

Tab. 7.5.7 Naměřené hodnoty v  $h = 1,5 \text{ cm}$  a  $r = 1 \text{ cm}$

Úhel[°]	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
B[μT]	10,9	10,5	10,3	10,2	10,1	9,8	9,8	9,6	9,7	9,7	9,7	9,9
Úhel[°]	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345
B[μT]	9,7	10	10,4	10,6	10,4	10,6	10,8	11	10,9	11,2	10,6	10,8

Tab. 7.5.8 Naměřené hodnoty v  $h = 1,5 \text{ cm}$  a  $r = 5 \text{ cm}$

Úhel[°]	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
B[μT]	17,1	17,3	17,3	17,4	17,5	17,4	17,4	17,7	17,7	17,8	17,8	17,7
Úhel[°]	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345
B[μT]	17,6	17,5	17,4	17,4	17,4	17,2	17,2	17	17,1	17,2	17,2	17,2

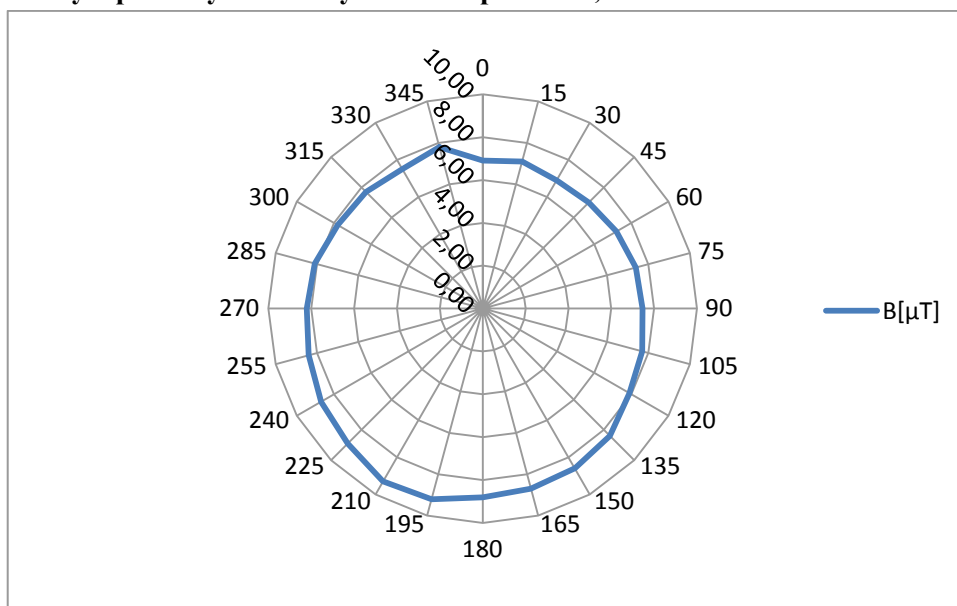
Tab. 7.5.9 Naměřené hodnoty v  $h = 1,5 \text{ cm}$  a  $r = 9 \text{ cm}$

### 7.5.2 Grafy a časové průběhy naměřených veličin

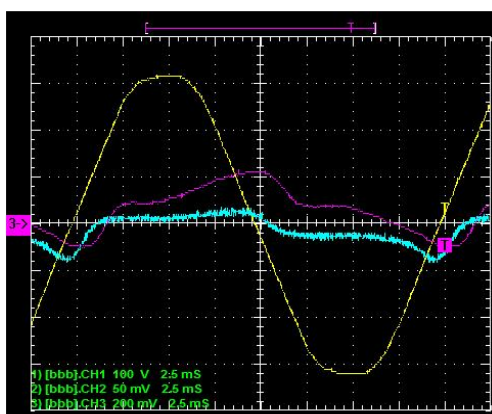
Zobrazené časové průběhy jednotlivých signálů jsou pro pozice  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  a  $270^\circ$ . Ostatní uložené časové průběhy jsou k dispozici v přílohách této práce. Označení veličin v záznamech z osciloskopu:

U [V] – Žlutá I [A] – Modrá B [μT] – Fialová

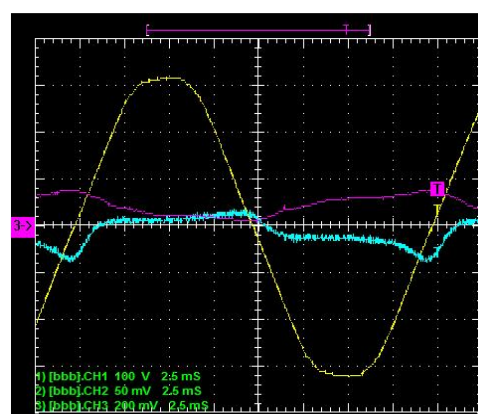
### 7.5.2.1 Grafy a průběhy naměřených veličin pro $h = 0,5 \text{ cm}$



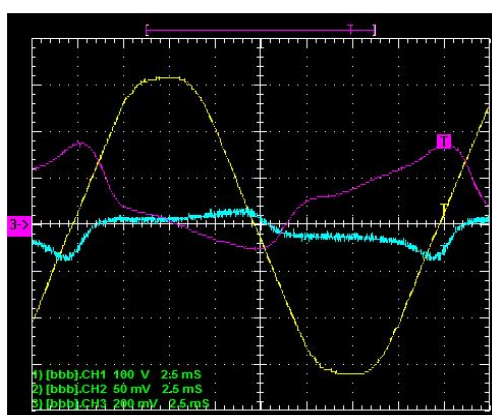
Obr. 7.5.1 Velikost magnetické indukce v okolí transformátoru pro  $r = 1 \text{ cm}$



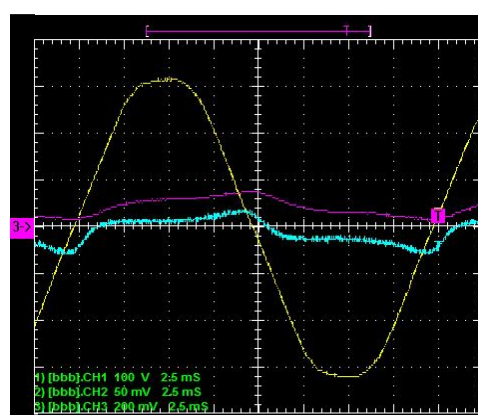
Obr. 7.5.2 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  v bodě  $0^\circ$



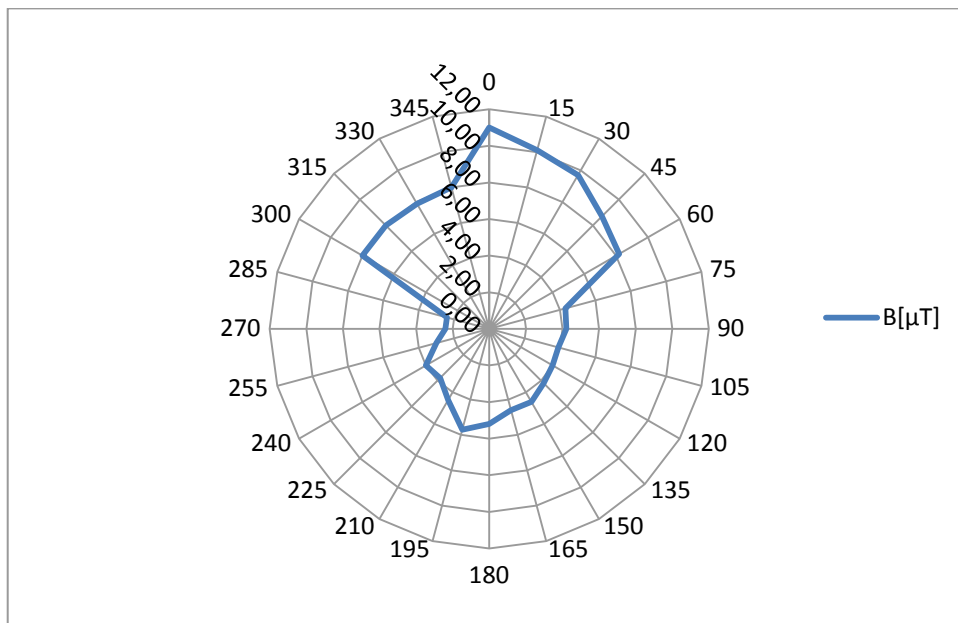
Obr. 7.5.3 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  v bodě  $90^\circ$



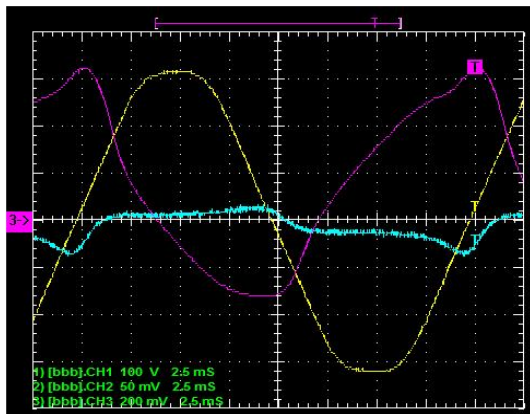
Obr. 7.5.4 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  v bodě  $180^\circ$



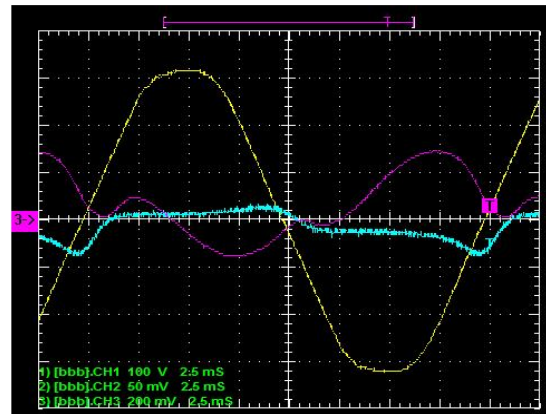
Obr. 7.5.5 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  v bodě  $270^\circ$



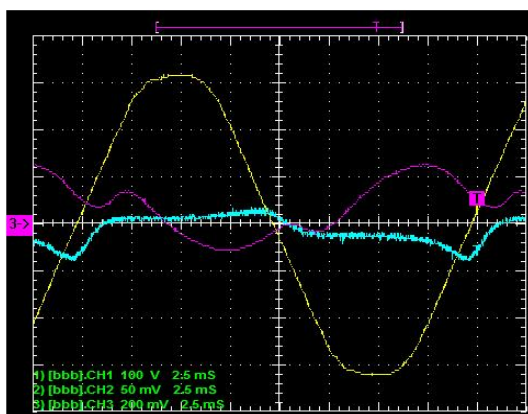
Obr. 7.5.6 Velikost magnetické indukce v okolí transformátoru pro  $r = 5 \text{ cm}$



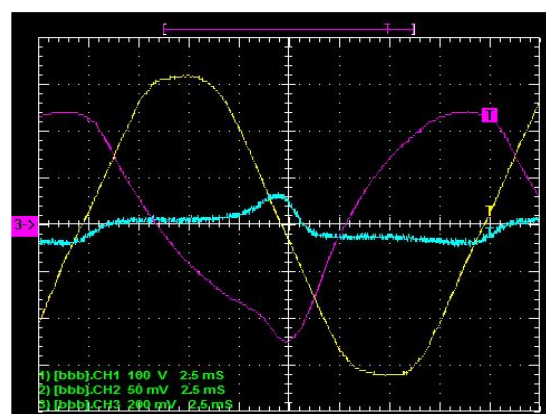
Obr. 7.5.7 Průběh  $U, I$  a  $B$  v bodě  $0^\circ$



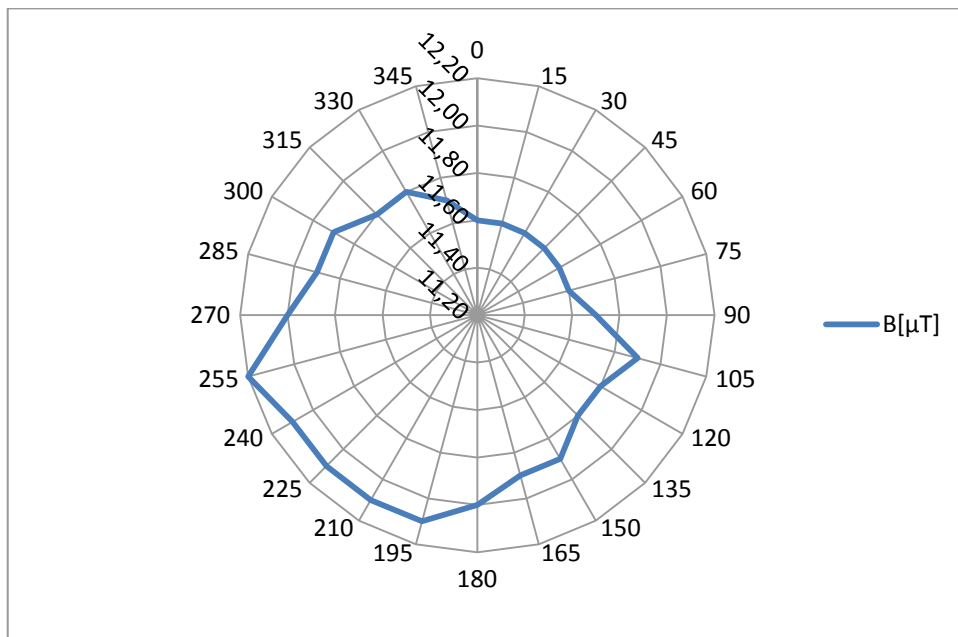
Obr. 7.5.8 Průběh  $U, I$  a  $B$  v bodě  $90^\circ$



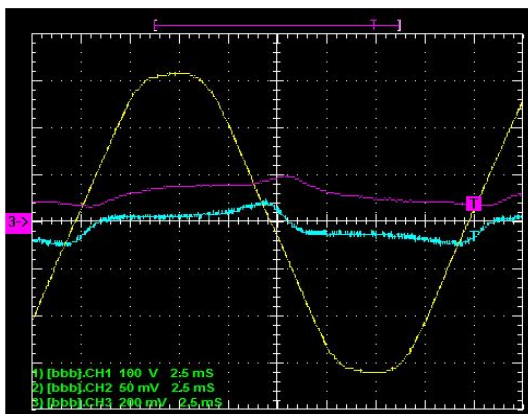
Obr. 7.5.9 Průběh  $U, I$  a  $B$  v bodě  $180^\circ$



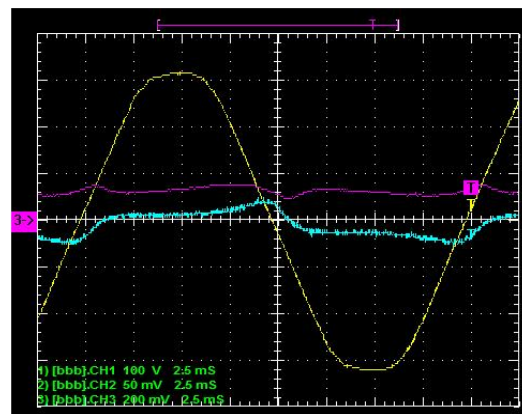
Obr. 7.5.10 Průběh  $U, I$  a  $B$  v bodě  $270^\circ$



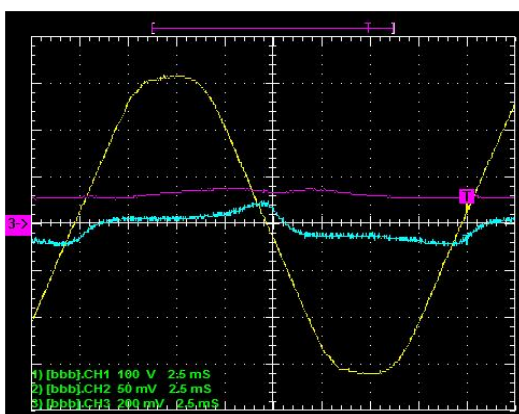
Obr. 7.5.11 Velikost magnetické indukce v okolí transformátoru pro  $r = 9 \text{ cm}$



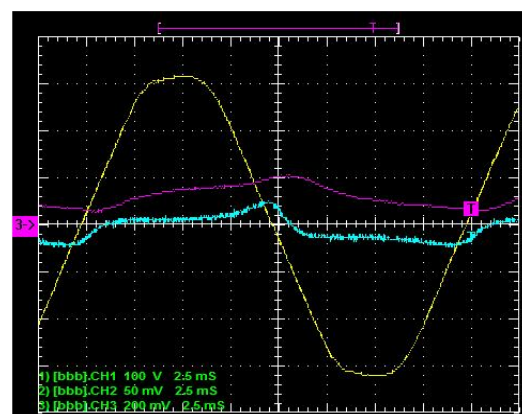
Obr. 7.5.12 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  v bodě  $0^\circ$



Obr. 7.5.13 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  v bodě  $90^\circ$



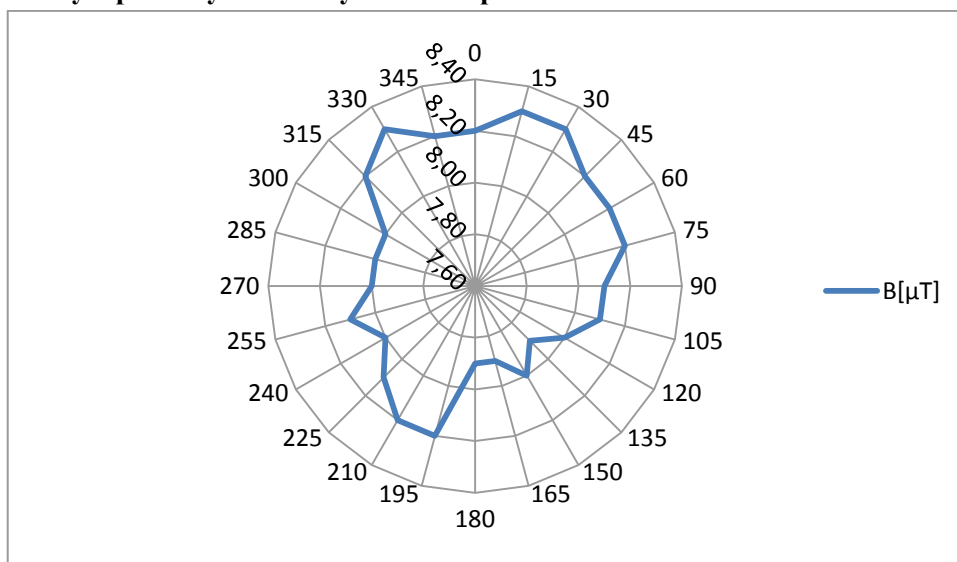
Obr. 7.5.14 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  v bodě  $180^\circ$



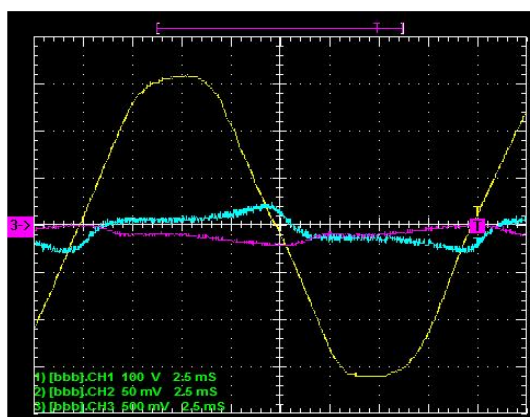
Obr. 7.5.15 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  v bodě  $270^\circ$



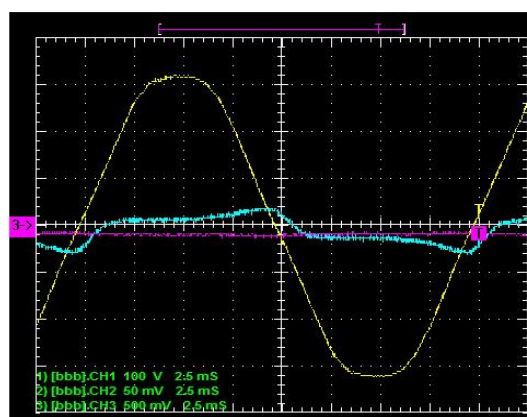
### 7.5.2.2 Grafy a průběhy naměřených veličin pro $h = 1 \text{ cm}$



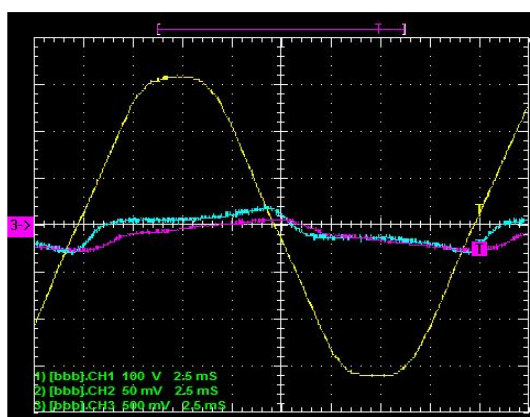
Obr. 7.5.16 Velikost magnetické indukce v okolí transformátoru pro  $r = 1 \text{ cm}$



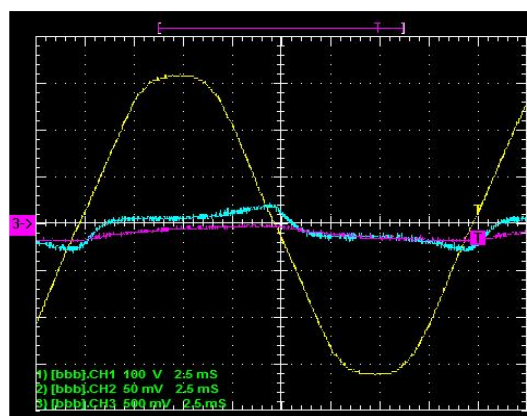
Obr. 7.5.17 Průběh  $U, I$  a  $B$  v bodě  $0^\circ$



Obr. 7.5.18 Průběh  $U, I$  a  $B$  v bodě  $90^\circ$

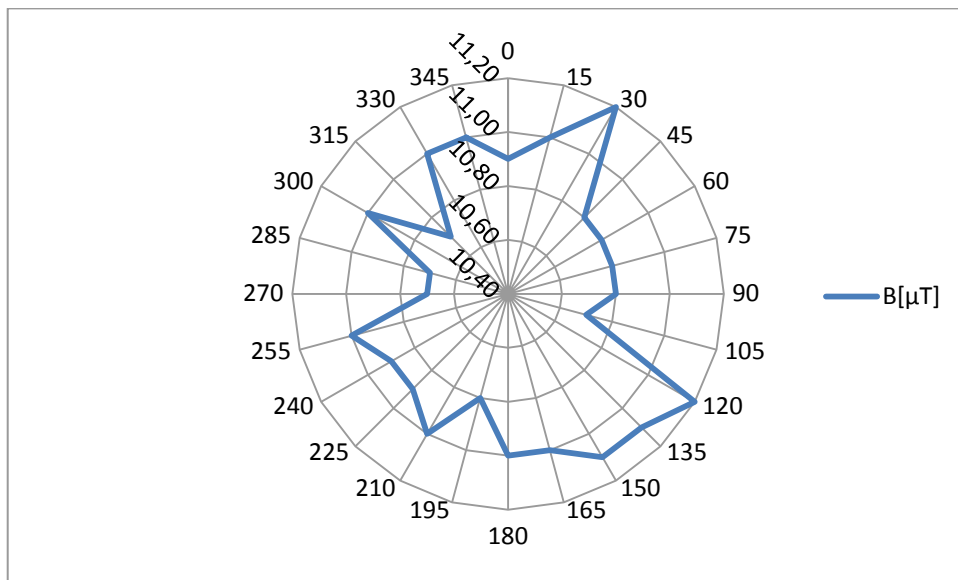


Obr. 7.5.20 Průběh  $U, I$  a  $B$  v bodě  $180^\circ$

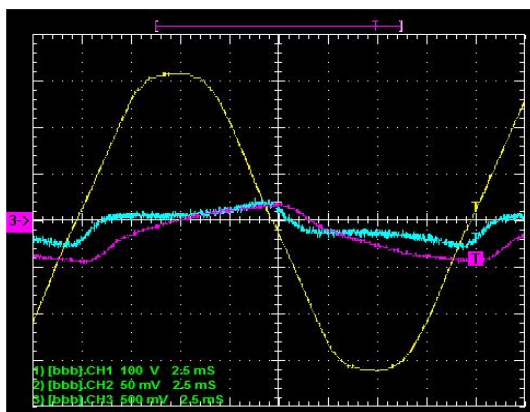


Obr. 7.5.21 Průběh  $U, I$  a  $B$  v bodě  $270^\circ$

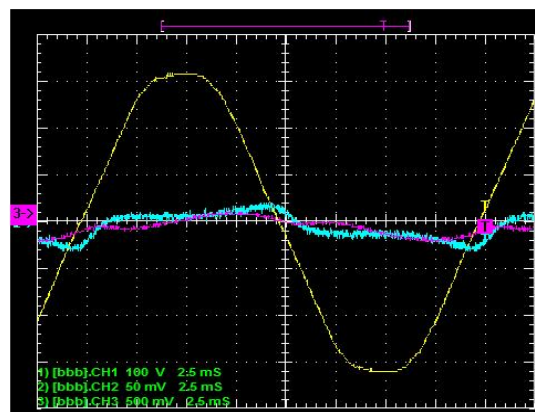




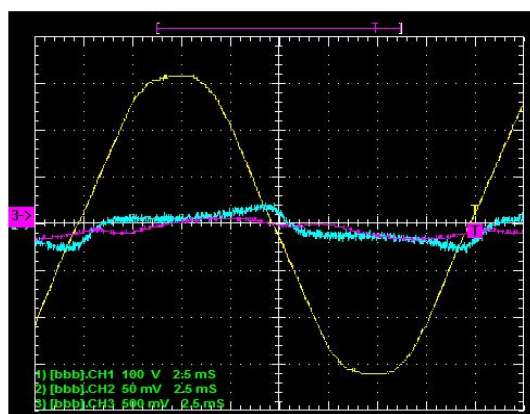
Obr. 7.5.20 Velikost magnetické indukce v okolí transformátoru pro  $r = 5 \text{ cm}$



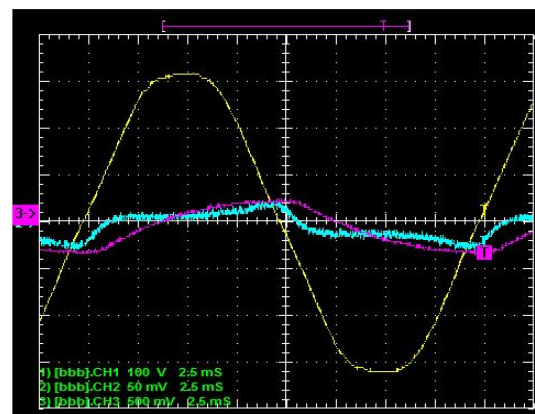
Obr. 7.5.22 Průběh  $U, I$  a  $B$  v bodě  $0^\circ$



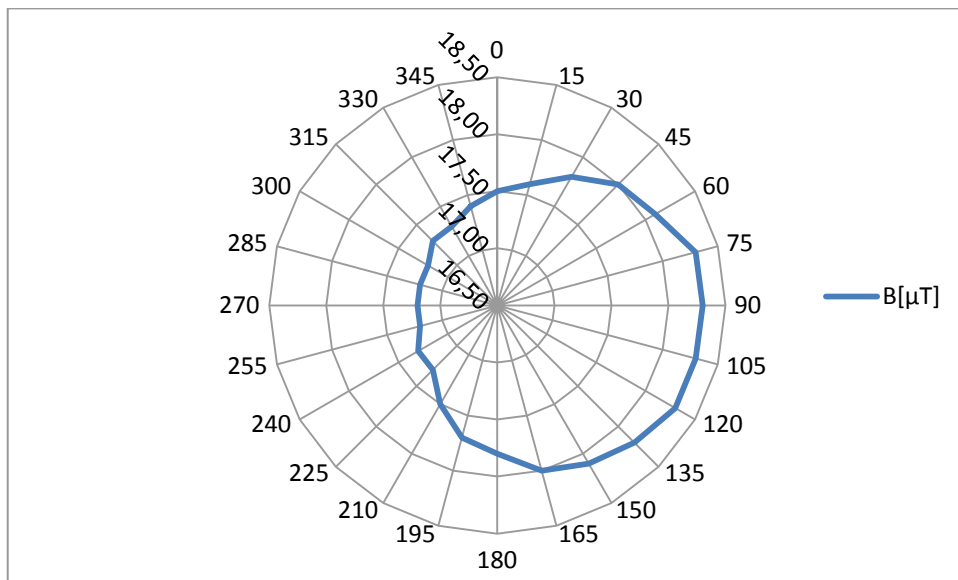
Obr. 7.5.23 Průběh  $U, I$  a  $B$  v bodě  $90^\circ$



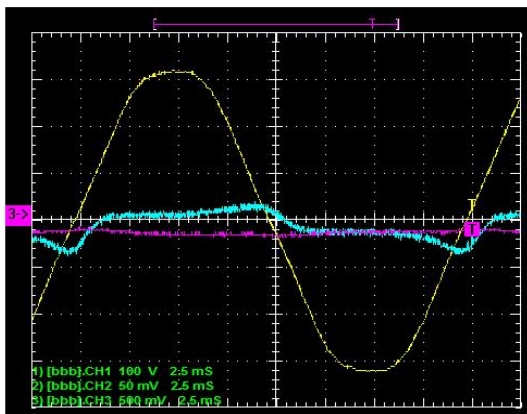
Obr. 7.5.24 Průběh  $U, I$  a  $B$  v bodě  $180^\circ$



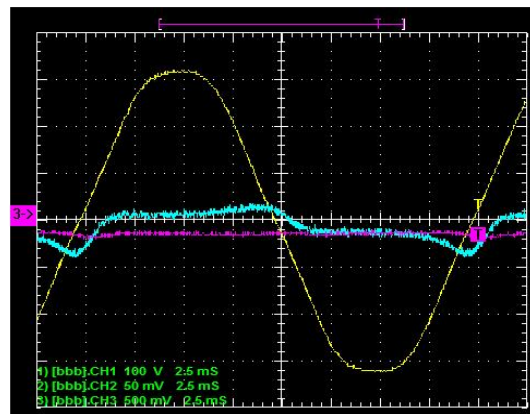
Obr. 7.5.25 Průběh  $U, I$  a  $B$  v bodě  $270^\circ$



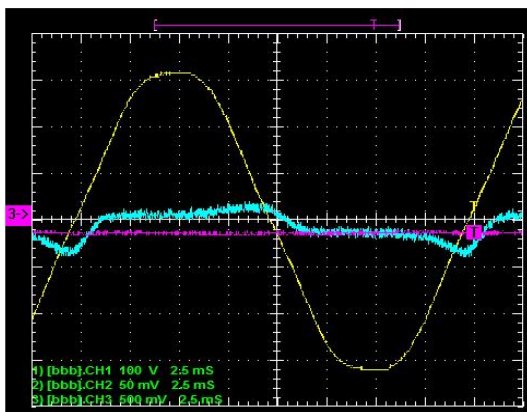
Obr. 7.5.26 Velikost magnetické indukce v okolí transformátoru pro  $r = 9 \text{ cm}$



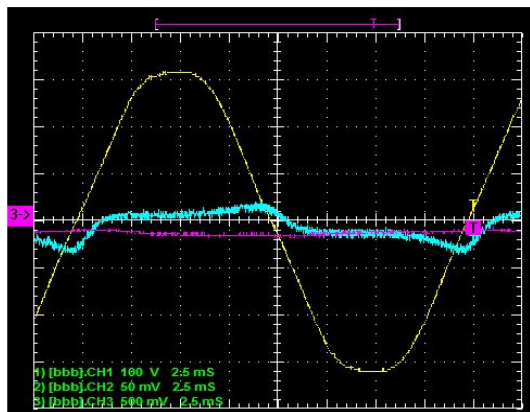
Obr. 7.5.27 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  v bodě  $0^\circ$



Obr. 7.5.28 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  v bodě  $90^\circ$

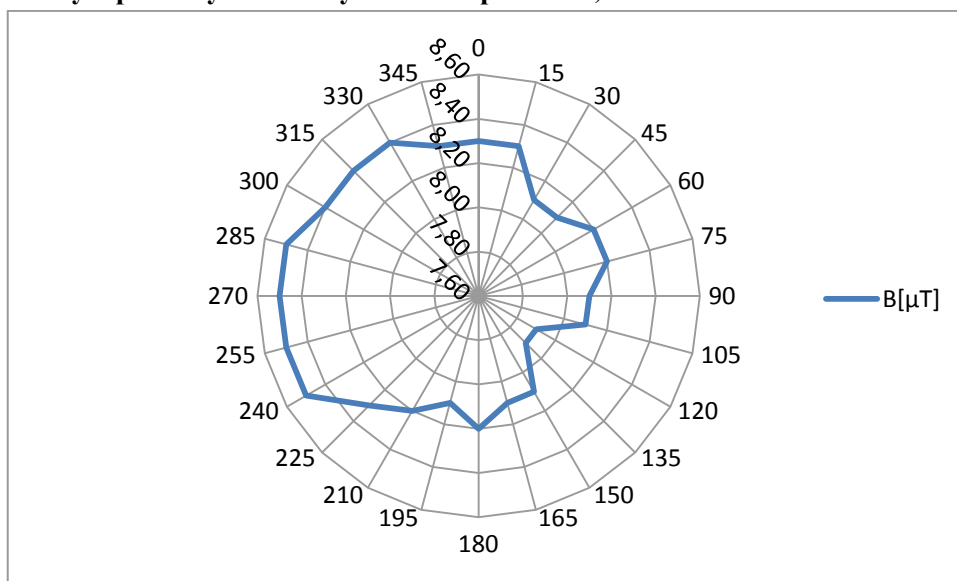


Obr. 7.5.29 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  v bodě  $180^\circ$

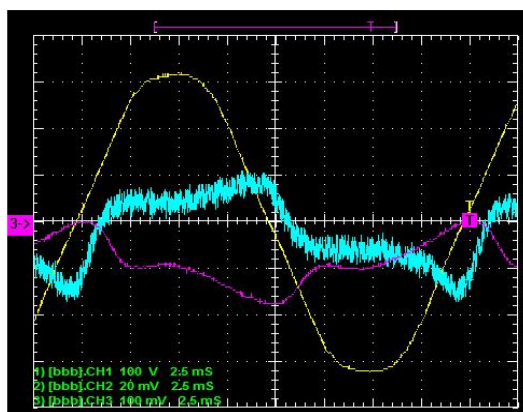


Obr. 7.5.30 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  v bodě  $270^\circ$

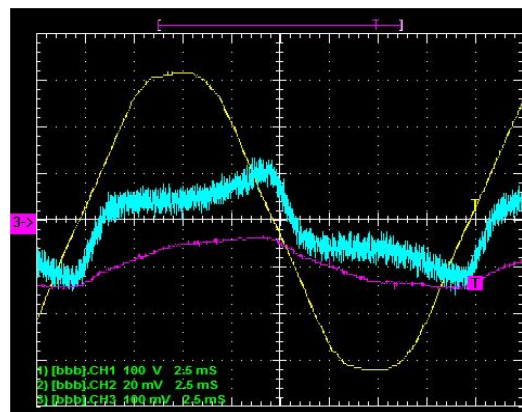
### 7.5.2.3 Grafy a průběhy naměřených veličin pro $h = 1,5$ cm



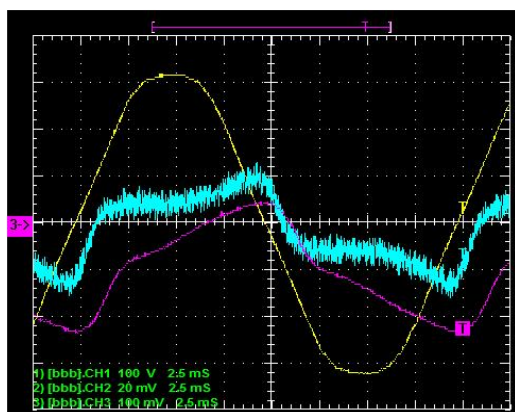
Obr. 7.5.31 Velikost magnetické indukce v okolí transformátoru pro  $r = 1$  cm



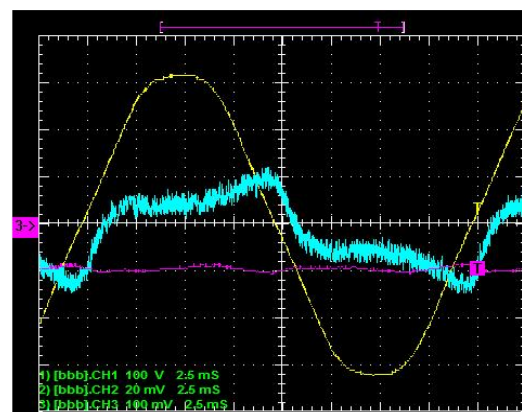
Obr. 7.5.32 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  v bodě  $0^\circ$



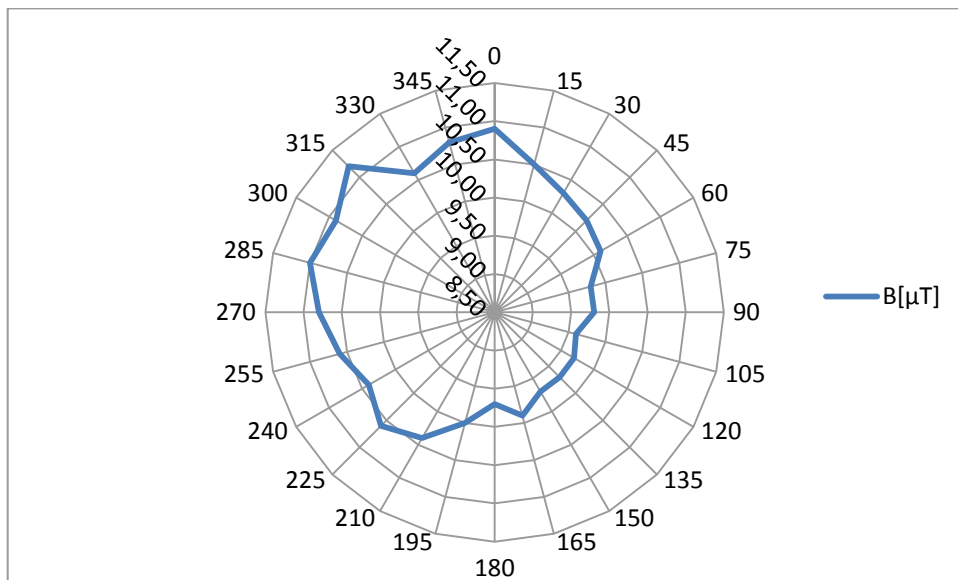
Obr. 7.5.33 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  v bodě  $90^\circ$



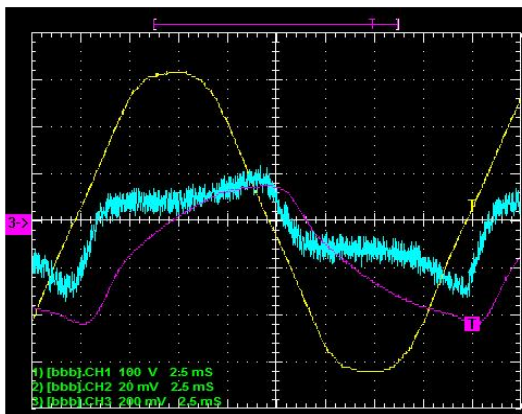
Obr. 7.5.34 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  v bodě  $180^\circ$



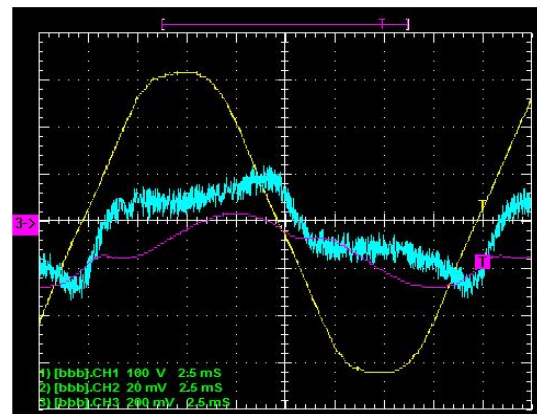
Obr. 7.5.35 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  v bodě  $270^\circ$



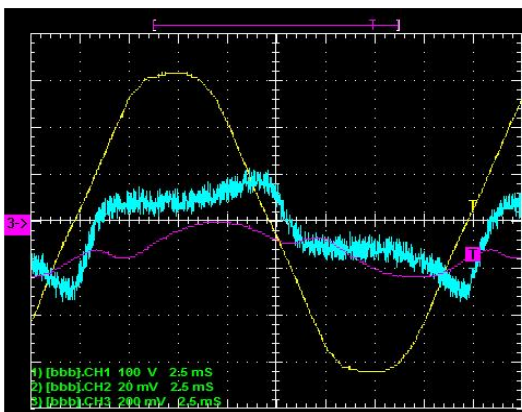
Obr. 7.5.35 Velikost magnetické indukce v okolí transformátoru pro  $r = 5 \text{ cm}$



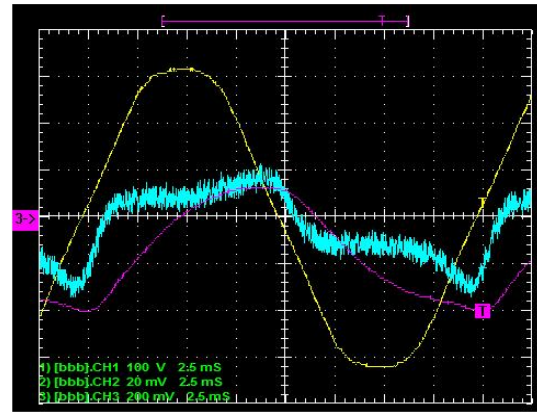
Obr. 7.5.36 Průběh  $U, I$  a  $B$  v bodě  $0^\circ$



Obr. 7.5.37 Průběh  $U, I$  a  $B$  v bodě  $90^\circ$

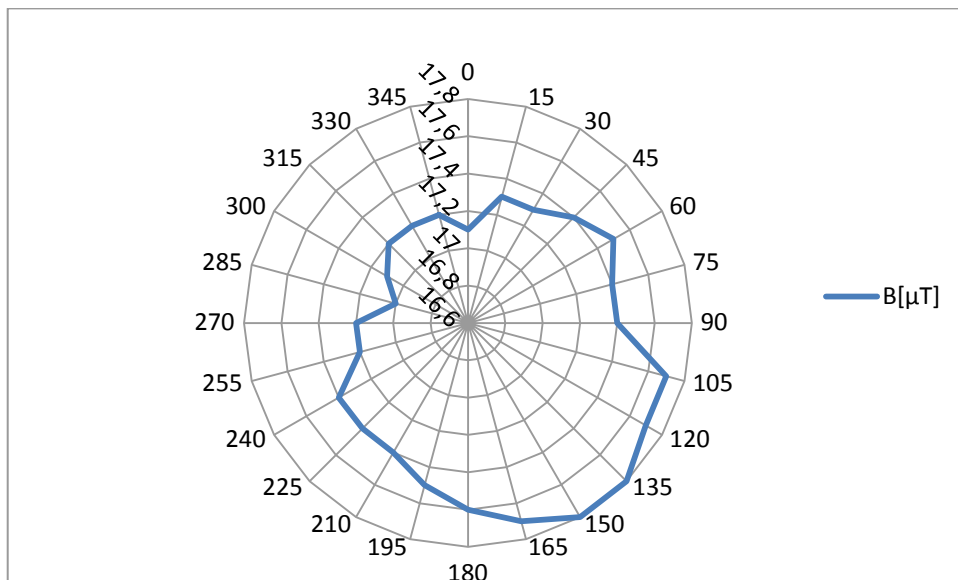


Obr. 7.5.38 Průběh  $U, I$  a  $B$  v bodě  $180^\circ$

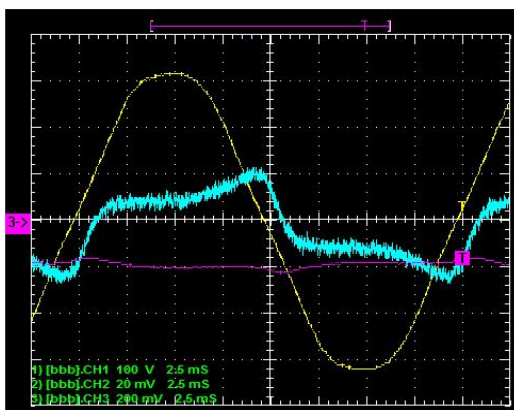


Obr. 7.5.39 Průběh  $U, I$  a  $B$  v bodě  $270^\circ$

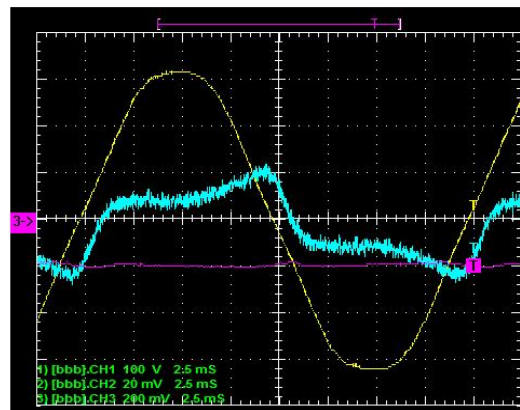




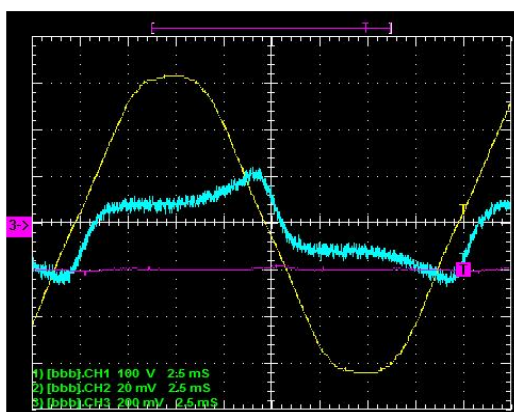
Obr. 7.5.40 Velikost magnetické indukce v okolí transformátoru pro  $r = 9 \text{ cm}$



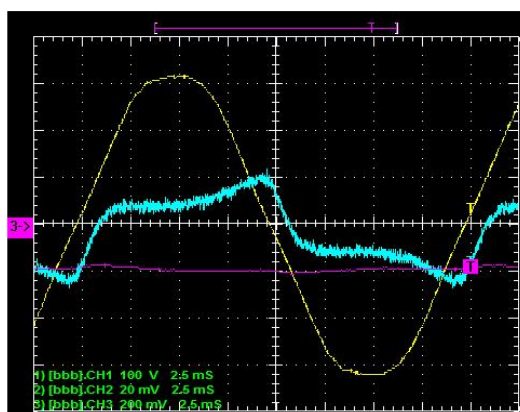
Obr. 7.5.41 Průběh  $U, I$  a  $B$  v bodě  $0^\circ$



Obr. 7.5.42 Průběh  $U, I$  a  $B$  v bodě  $90^\circ$



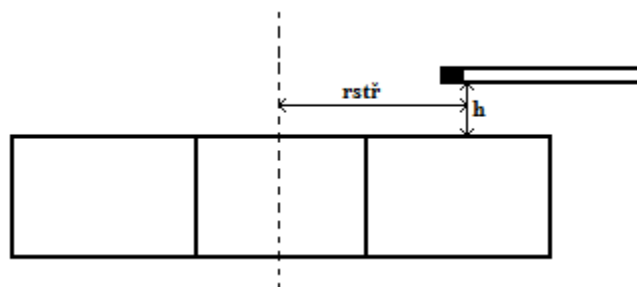
Obr. 7.5.43 Průběh  $U, I$  a  $B$  v bodě  $180^\circ$



Obr. 7.5.44 Průběh  $U, I$  a  $B$  v bodě  $270^\circ$

## 7.6 Měření č. 2

V druhé úloze bylo nutné vypočítat poloměr střední siločáry  $r_{stř}$ , na kterém bylo provedeno měření ve výšce 1 cm nad transformátorem. Pomocí autotransformátoru bylo zvyšováno napětí od 230 V do 250 V s krokem 10 V. Samotné zjišťování rozložení magnetického pole proběhlo obdobně jako v předešlé úloze, natáčením transformátoru umístěném na přípravku s krokem natáčení  $30^\circ$ . I v této úloze se měřila stejnosměrná složka magnetické indukce. Změřené hodnoty byly zaznamenány do tabulek. Pro každý krok na dané napěťové hladině byl uložen průběh z digitálního osciloskopu. Všechna naměřená data, grafy a průběhy z osciloskopu jsou k dispozici v přílohách této práce.



Obr. 7.6 Naznačení měřených pozic

Poloměr střední siločáry

$$r_{stř} = \frac{r_o + r_i}{2} = \frac{69,5 + 29,5}{2} = 49,5 \text{ mm} \quad (7.6.1.1)$$

### 7.6.1 Naměřené hodnoty

Úhel[°]	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
B[μT]	9,90	9,90	9,90	10,00	10,00	9,90	9,70	9,70	9,50	9,90	9,80	9,60

Tab. 7.6.1 Naměřené hodnoty pro  $U = 230 \text{ V}$

Úhel[°]	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
B[μT]	9,90	9,90	9,90	10,00	10,10	9,90	9,70	9,60	9,70	9,70	9,70	9,90

Tab. 7.6.2 Naměřené hodnoty pro  $U = 240 \text{ V}$

Úhel[°]	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
B[μT]	10,40	10,30	10,30	10,00	9,90	9,80	9,80	9,90	9,70	9,80	10,10	10,30

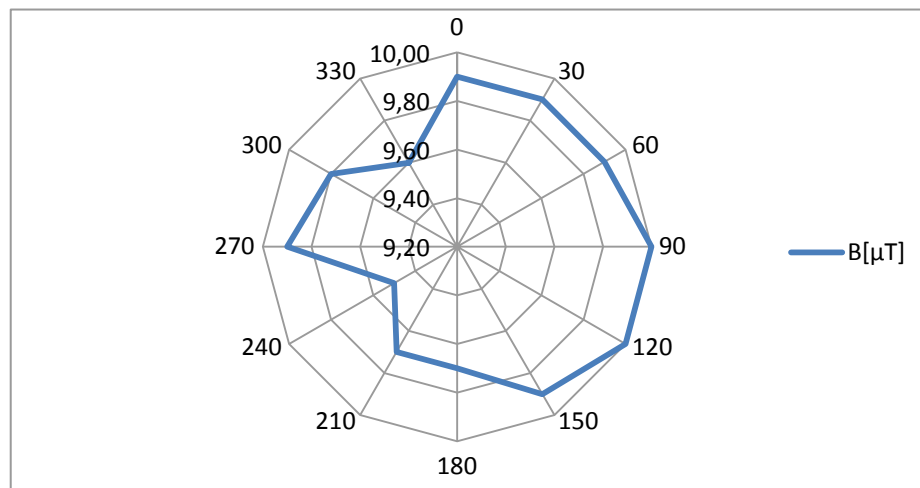
Tab. 7.6.3 Naměřené hodnoty pro  $U = 250 \text{ V}$

## 7.6.2 Grafy a časové průběhy naměřených veličin

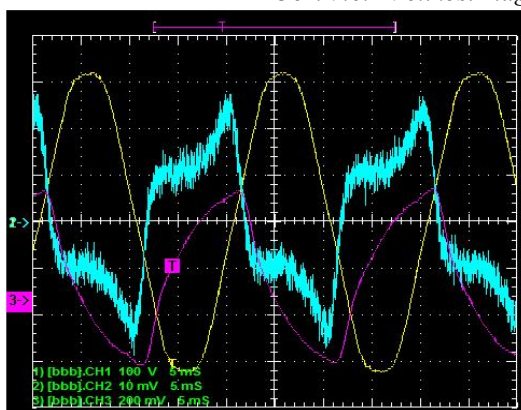
Zobrazené osciloskopické záznamy jsou pouze pro body  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  a  $270^\circ$ . Ostatní časové průběhy jsou k dispozici v přílohách této práce. Označení časových průběhů v záznamu z osciloskopu:

U [V] – Žlutá I [A] – Modrá B [ $\mu$ T] – Fialová

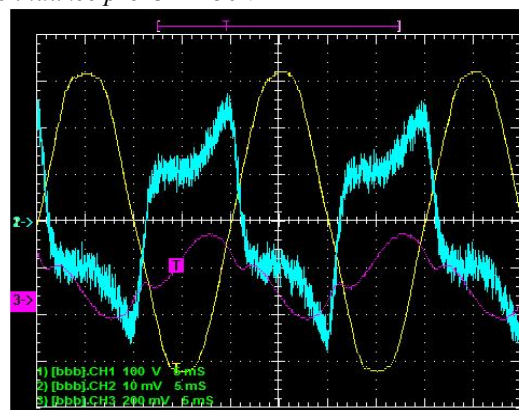
### 7.6.2.1 Grafy a časové průběhy naměřených veličin pro U = 230 V



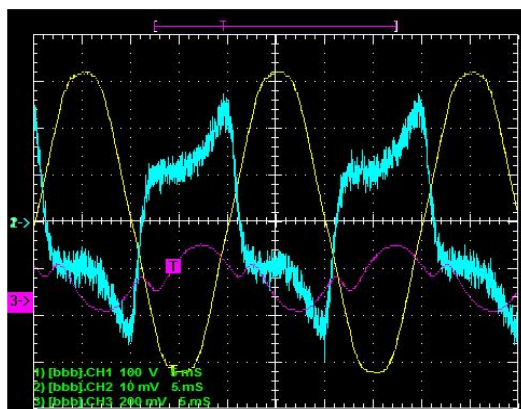
Obr. 7.6.1 Velikost magnetické indukce pro U = 230 V



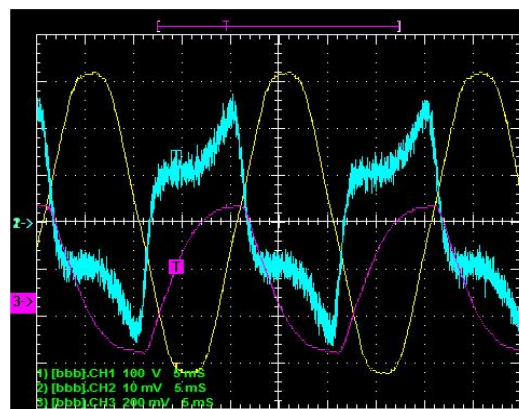
Obr. 7.6.2 Průběh U, I a B v bodě  $0^\circ$



Obr. 7.6.3 Průběh U, I a B v bodě  $90^\circ$

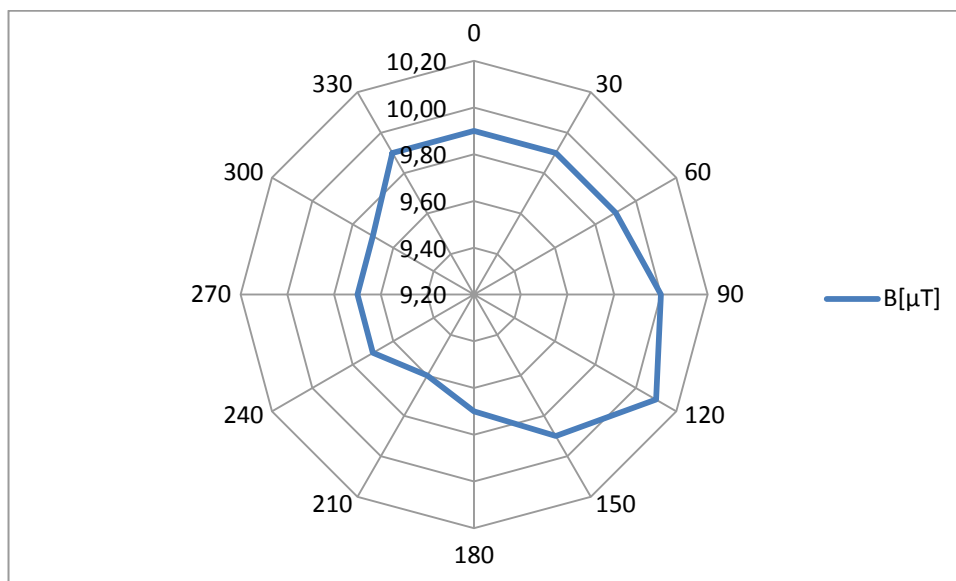


Obr. 7.6.4 Průběh U, I a B v bodě  $180^\circ$

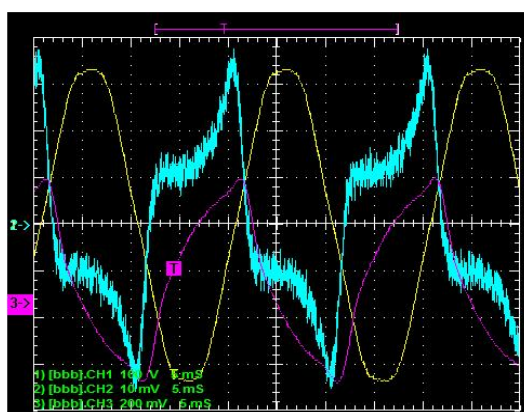


Obr. 7.6.5 Průběh U, I a B v bodě  $270^\circ$

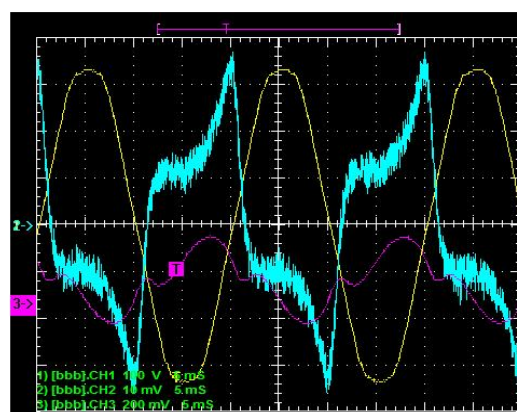
### 7.6.2.2 Grafy a časové průběhy naměřených veličin pro $U = 240\text{ V}$



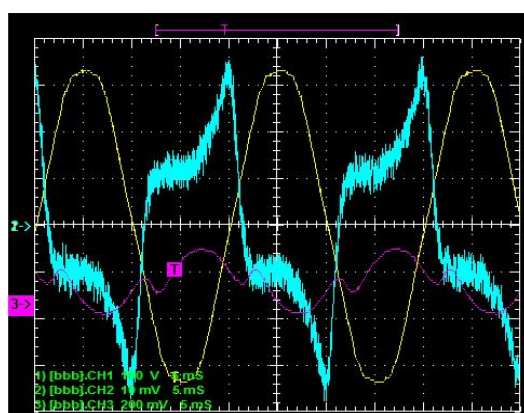
Obr. 7.6.6 Velikost magnetické indukce pro  $U = 240\text{ V}$



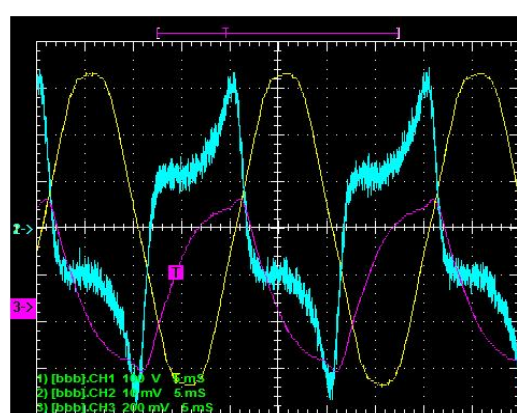
Obr. 7.6.7 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  v bodě  $0^\circ$



Obr. 7.6.8 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  v bodě  $90^\circ$



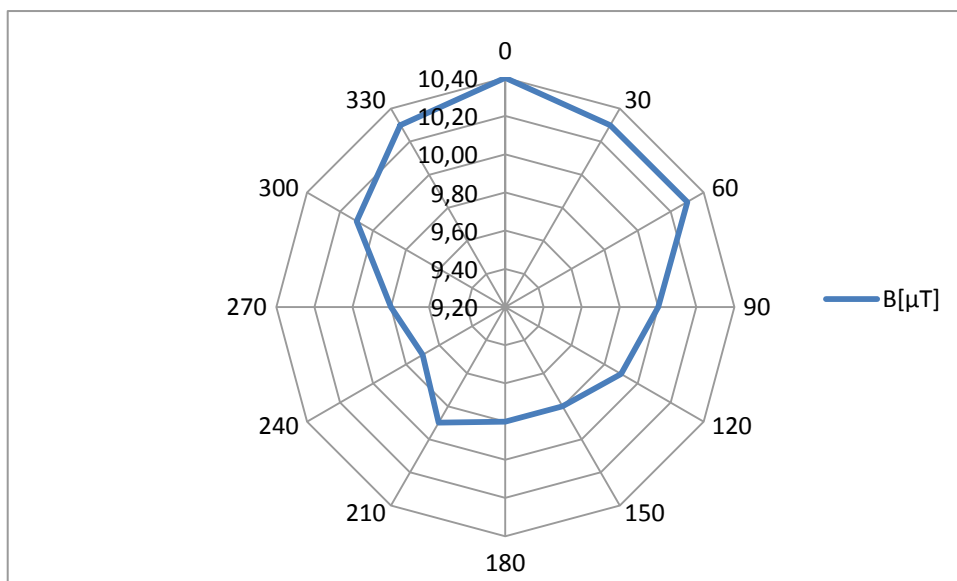
Obr. 7.6.9 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  v bodě  $180^\circ$



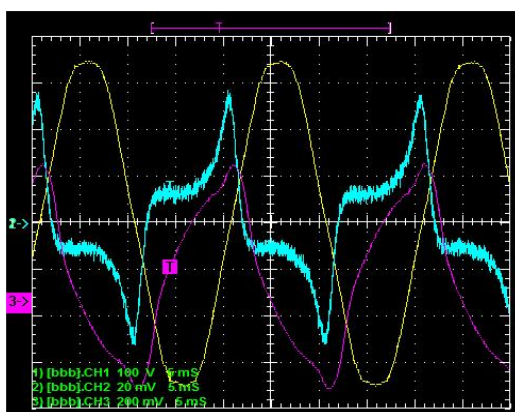
Obr. 7.6.10 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  v bodě  $270^\circ$



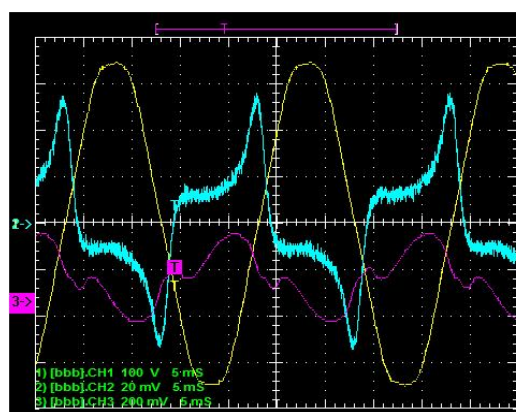
### 7.6.2.3 Grafy a časové průběhy naměřených veličin pro $U = 250\text{ V}$



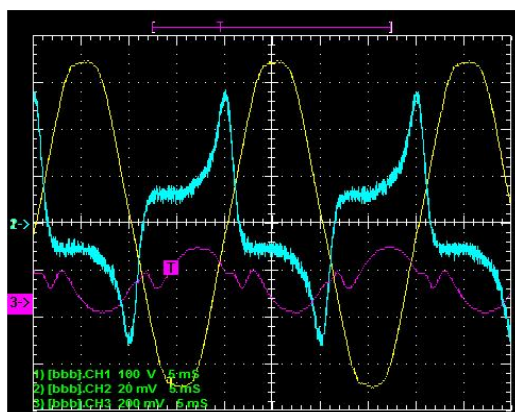
Obr. 7.6.11 Velikost magnetické indukce pro  $U = 250\text{ V}$



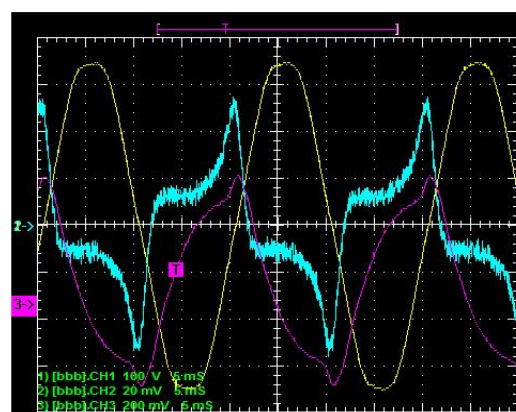
Obr. 7.6.12 Průběh  $U, I$  a  $B$  v bodě  $0^\circ$



Obr. 7.6.13 Průběh  $U, I$  a  $B$  v bodě  $90^\circ$



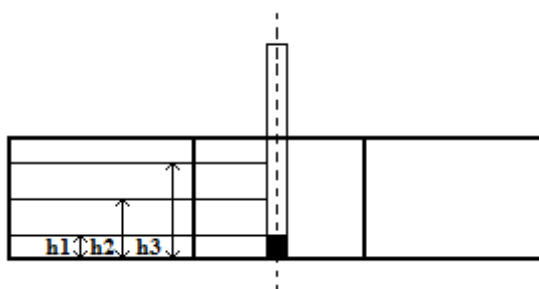
Obr. 7.6.14 Průběh  $U, I$  a  $B$  v bodě  $180^\circ$



Obr. 7.6.15 Průběh  $U, I$  a  $B$  v bodě  $270^\circ$

## 7.7 Měření č. 3

V poslední úloze bylo provedeno zjišťování magnetické indukce v ose Z ve středu jádra. Měření bylo provedeno na třech výškových úrovních senzoru se zvyšováním vstupního napětí v rozsahu od 0 po 250 V na každé úrovni. Úrovně jsou vztaženy k referenčnímu bodu na měřicí sondě, který naznačuje, že senzor je umístěn ve výšce cca 1 cm od začátku sondy. Opět v této úloze byla měřena stejnosměrná složka magnetické indukce. V tomto měření bylo zvyšováno napětí s krokem 100 V do 200 V. Nad hodnotou 200 V s krokem zvýšení po 10 V. Naměřené hodnoty magnetické indukce byly zaznamenány do tabulek a pro každou hodnotu zaznamenán časový průběh veličin z osciloskopu.



Obr. 7.7 Naznačení měřených pozic

### 7.7.1 Naměřené hodnoty

U [V]	0	100	200	220	230	240	250
B [ $\mu$ T]	-23,30	-23,20	-23,40	-23,40	-23,70	-23,60	-23,50

Tab. 7.7.1 Naměřené hodnoty ve výšce senzoru  $h = 10$  mm

U [V]	0	100	200	220	230	240	250
B [ $\mu$ T]	-29,20	29,30	-29,50	-29,50	29,30	-29,30	-29,20

Tab. 7.7.2 Hodnoty ve výšce senzoru  $h = 28,25$  mm

U [V]	0	100	200	220	230	240	250
B [ $\mu$ T]	-36,80	-36,70	-36,60	-37,20	-36,50	-37,00	-37,20

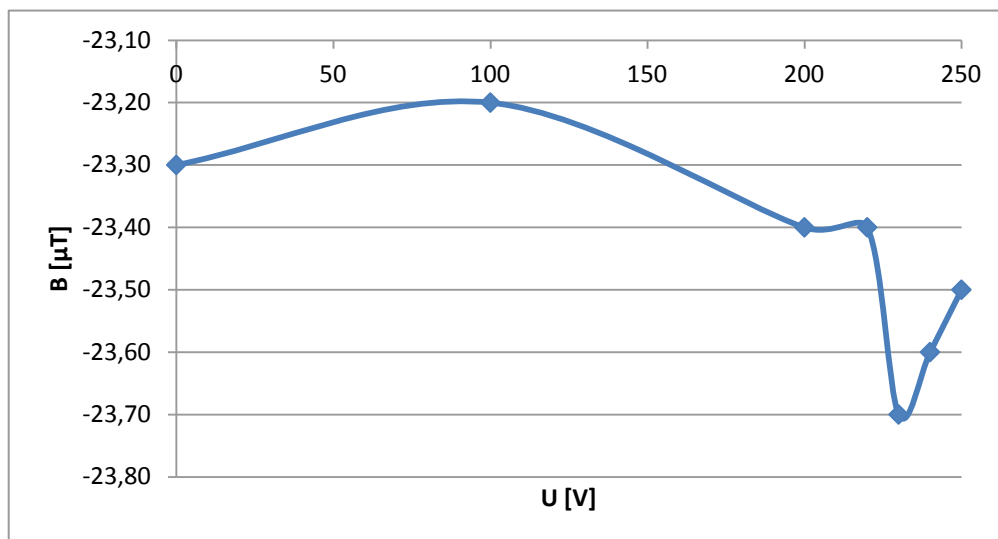
Tab. 7.7.3 Hodnoty ve výšce senzoru  $h = 46,5$  mm

### 7.7.2 Grafy a časové průběhy naměřených veličin

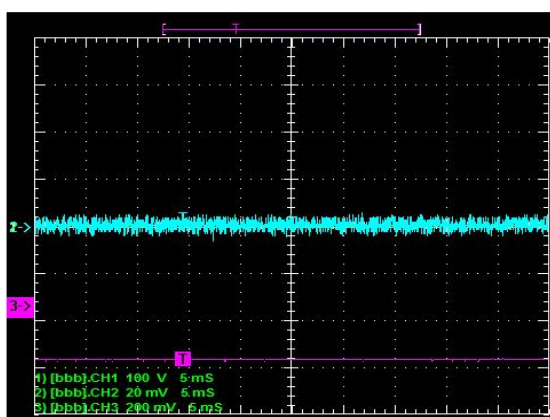
Zobrazené záznamy z osciloskopu jsou pro napětí 0 V, 100 V, 230 V a 250 V. Ostatní časové průběhy jsou k dispozici v přílohách této práce. Označení veličin v záznamu z osciloskopu:

U [V] – Žlutá I [A] – Modrá B [ $\mu$ T] – Fialová

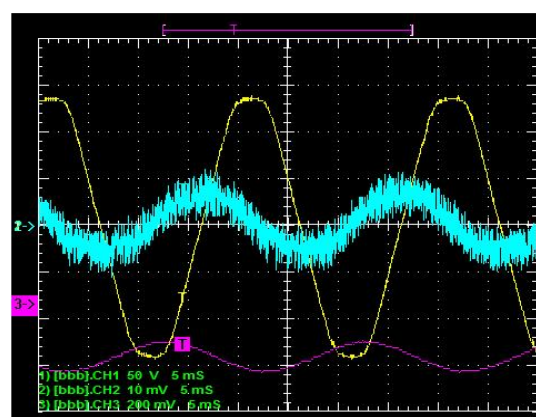
### 7.7.2.1 Grafy a časové průběhy naměřených veličin pro $h = 10$ mm nad kotoučem



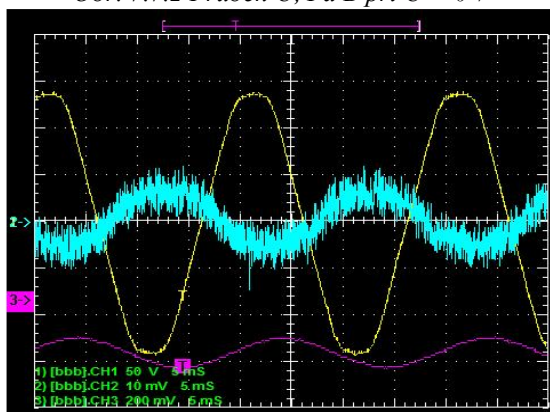
Obr. 7.7.1 Graf magnetické indukce v závislosti na napětí



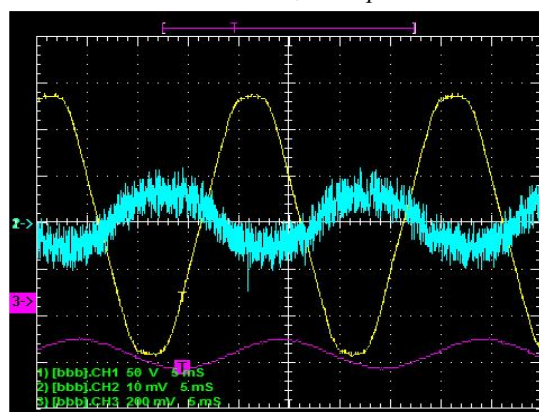
Obr. 7.7.2 Průběh  $U, I$  a  $B$  při  $U = 0$  V



Obr. 7.7.3 Průběh  $U, I$  a  $B$  při  $U = 100$  V

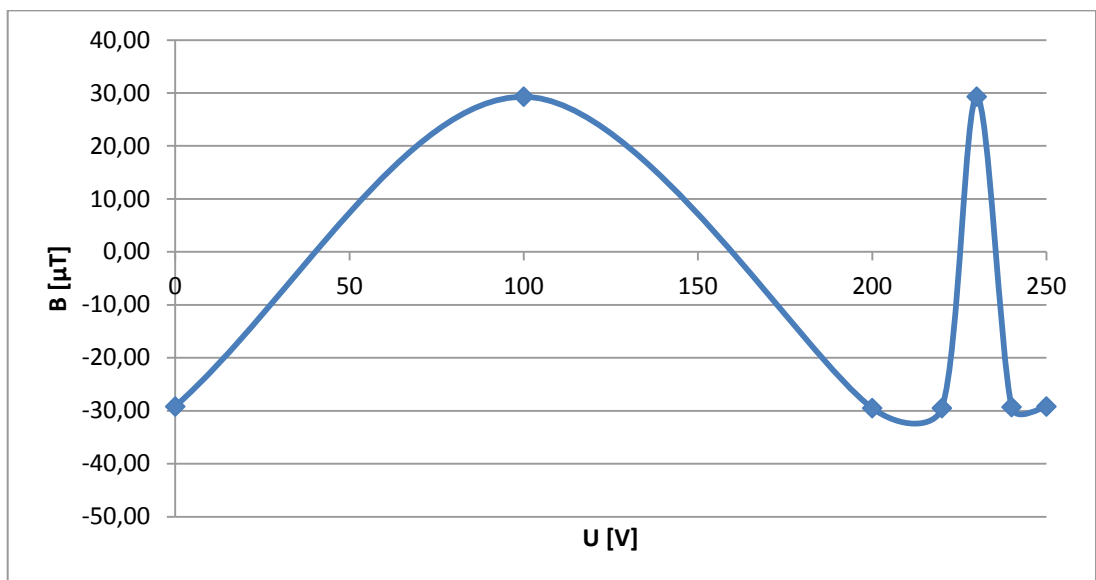


Obr. 7.7.4 Průběh  $U, I$  a  $B$  při  $U = 230$  V

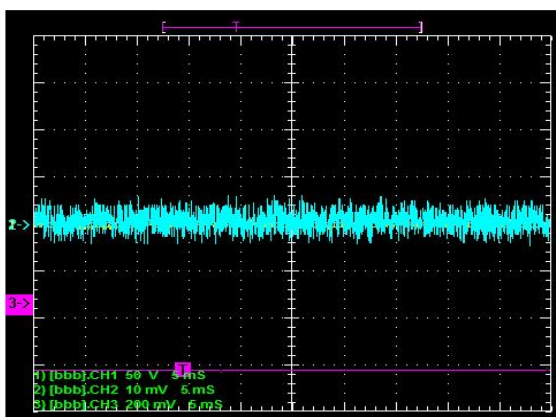


Obr. 7.7.5 Průběh  $U, I$  a  $B$  při  $U = 230$  V

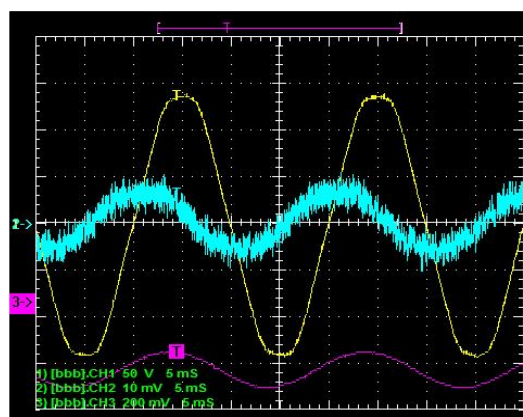
### 7.7.2.2 Grafy a průběhy naměřených veličin pro $h = 28,25$ mm nad kotoučem



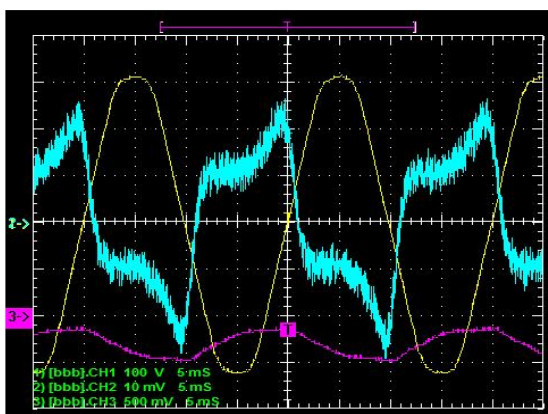
Obr. 7.7.6 Graf magnetické indukce v závislosti na napětí



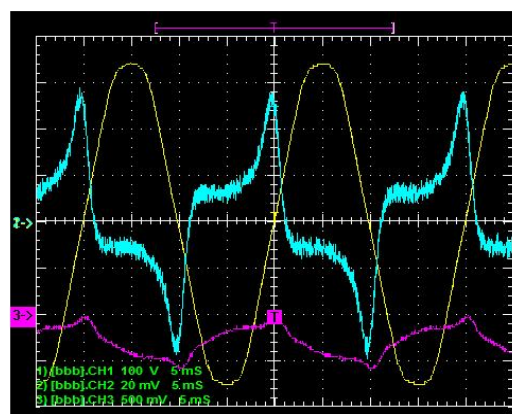
Obr. 7.7.7 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  při  $U = 0$  V



Obr. 7.7.8 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  při  $U = 100$  V



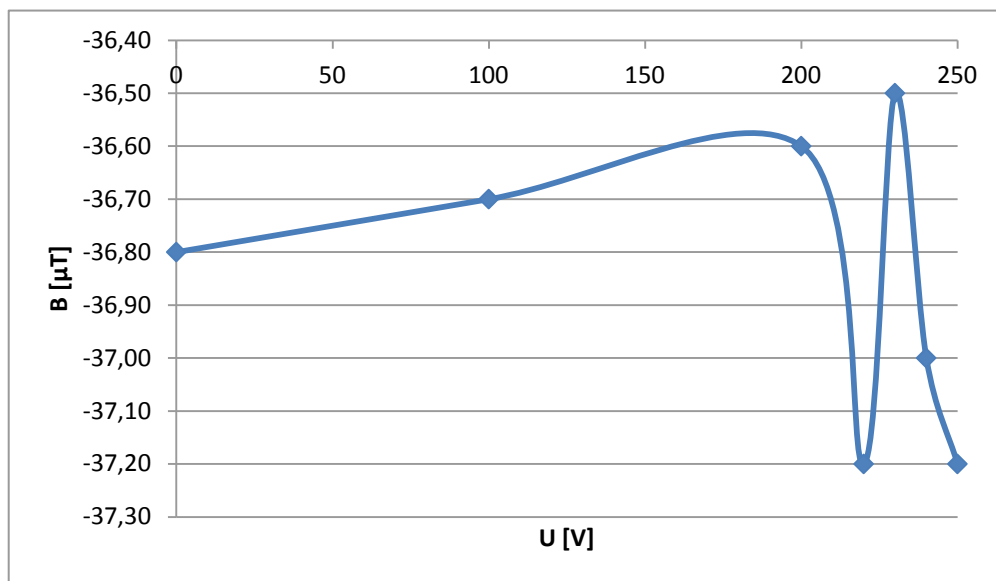
Obr. 7.7.9 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  při  $U = 230$  V



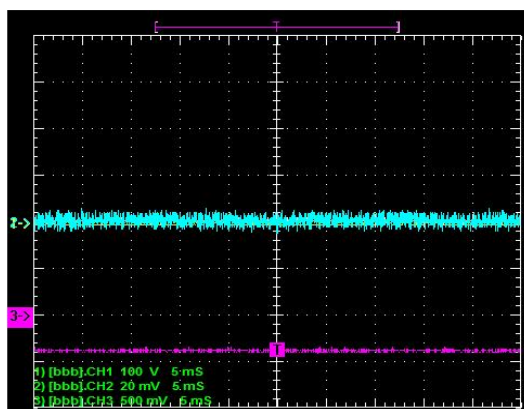
Obr. 7.7.10 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  při  $U = 250$  V



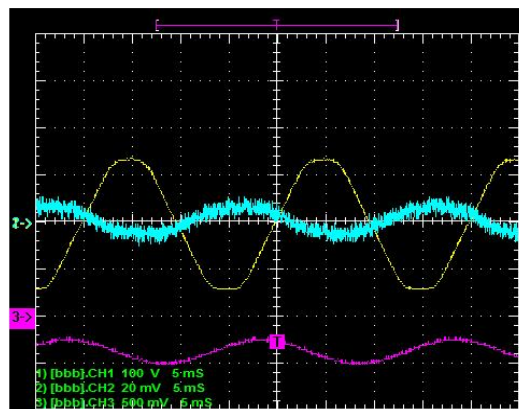
### 7.7.2.3 Grafy a průběhy naměřených veličin pro $h = 46,5$ mm nad kotoučem



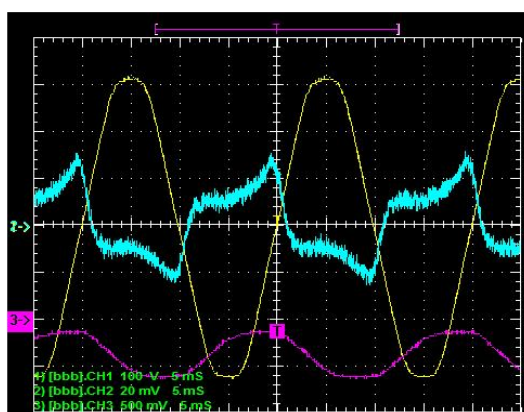
Obr. 7.7.11 Graf magnetické indukce v závislosti na napětí



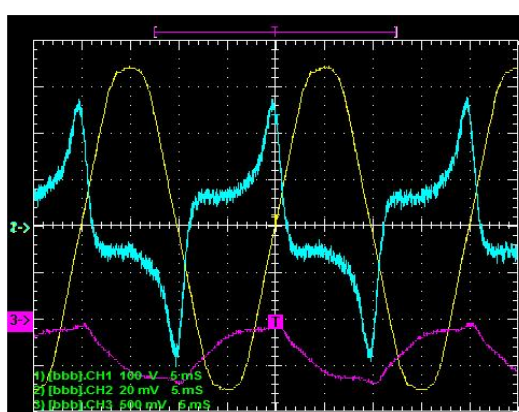
Obr. 7.7.12 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  při  $U = 0$  V



Obr. 7.7.13 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  při  $U = 100$  V



Obr. 7.7.14 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  při  $U = 230$  V



Obr. 7.7.15 Průběh  $U$ ,  $I$  a  $B$  při  $U = 250$  V

## 8. Zhodnocení experimentu a závěr

---

Ze zobrazených grafů je zřejmé, že velikost magnetické indukce se v každém bodě liší. Tato skutečnost může být způsobena rušivými vlivy, vzduchovými mezerami vzniklými při navinutí magnetického obvodu nebo nesymetrií ve vinutí. Během porovnávání průběhů z osciloskopu jsem došel k závěru, že magnetická indukce v okolí transformátoru, je silně závislá na proudu naprázdno, jelikož proud naprázdno nejlépe vyjadřuje jak sycení magnetického obvodu transformátoru, tak i rozptylové magnetické pole v okolí transformátoru.

Závislost magnetické indukce na proudu naprázdno, je nejlépe zobrazena na záznamech z osciloskopu v měření č. 2. Celkové sycení jádra je zřetelné z časových průběhů napájecího napětí, proudu naprázdno a rozptylového magnetického pole změřených na poloměru střední siločáry. Hodnoty magnetické indukce rozptylového magnetického toku, jsou silně závislé na velikosti napájecího napětí a tomu odpovídajícímu magnetizačnímu proudu. Jednotlivé velikosti jsou uvedeny v tabulkách a grafech měřených úloh.

Výsledné hodnoty magnetické indukce dosahují velikosti  $\pm 50 \mu\text{T}$  a jsou závislé na konkrétní pozici axiální sondy, vzhledem k toroidnímu transformátoru. Směr rozptylového magnetického toku odpovídá příčnému magnetickému poli, vzniklého při magnetickém sycení toroidního jádra vinutého z ETE plechu. Vzhledem k vysoké kvalitě ETE plechu pro dané jádro transformátoru, má na velikost magnetického pole v okolí jádra vliv magnetické pole země a jiné zdroje rušení. Tato rušení způsobují posun stejnosměrné složky rozptylového pole, ale také mírnou magnetizaci jádra. Závěrem je nutno říci, že teoretické vyjádření rozptylových hodnot je matematicky velmi obtížné a reálné chování tak vyjadřuje tato práce.

### *Osobní přínos práce*

Za osobní přínos této práce považuji, seznámení s problematikou transformátorů, sycení magnetických obvodů a s tím spojenou problematikou elektromagnetického pole. Tato práce může v budoucnu pomoci při správném návrhu toroidních transformátorů nebo posloužit pro diagnostiku závad a poruchových stavů toroidních transformátorů.

## Seznam literatury

---

- [1] DRAXLER, K., KAŠPAR, P., RIPKA, P.: *Magnetické prvky a měření*. Vyd. 3. V Praze: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008, 276 s. ISBN 978-80-01-03970-0
- [2] DUFEK, M.: *Magnetická měření*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1964, 403 s.
- [3] KALOUSEK, V.: *Teorie elektromagnetického pole*. Praha, 1986.
- [4] BROŽ, J.: *Moderní problémy feromagnetismu*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1962.
- [5] FAKTOR, Z.: *Transformátory a cívky*. Praha, 1999, 392 s. ISBN 80-860-5649-X.
- [6] TKOTZ, Klaus. *Příručka pro elektrotechniku*. 2. dopl. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2006, 623 s. ISBN 80-867-0613-3.
- [7] SKÁLA, M. *Transformátory*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1964, 353 s.
- [8] MAREK, Martin. *Způsoby zjišťování magnetických vlastností konstrukčních materiálů, specifické příklady užití a aplikací magnetických měření*. Ostrava, 2005. Disertační práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektrických strojů a přístrojů.
- [9] FOLVARČNÝ, A. *Typové transformátory: Vliv teploty na proud naprázdno* [online]. Ostrava, 2009 [cit. 2012-05-03]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/73989>. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, katedra energetiky. Vedoucí práce Ing. Martin Marek PhD.
- [10] KONEČNÝ, P.: *Vliv plechů z amorfní oceli na prostupnost rušení transformátory* [online]. Brno, 2010 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=27791](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27791). Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. JOSEF PAVLÍK.
- [11] Magnetická měření. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: [http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/predmety/x38emc/EMC-Predn\\_11tisk.pdf](http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/predmety/x38emc/EMC-Predn_11tisk.pdf)
- [12] Transformátory. [Http://www.outech-havirov.cz](http://www.outech-havirov.cz) [online]. 2009 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: [http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna\\_eltech/esp/transformatory.pdf](http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/esp/transformatory.pdf)
- [13] Výpočet a návrh transformátoru. [Http://www.dmu-mez.ic.cz](http://www.dmu-mez.ic.cz) [online]. 25.10.2008 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: [http://www.dmu-mez.ic.cz/I\\_Vypocet\\_a\\_navr\\_h\\_transformatoru.pdf](http://www.dmu-mez.ic.cz/I_Vypocet_a_navr_h_transformatoru.pdf)
- [14] Elimag MP - 1 teslametr. [Http://www.elidis.cz](http://www.elidis.cz) [online]. 2010 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://www.elidis.cz/index.php?menu=50>
- [15] Měření transformátoru naprázdno a nakrátko. [Http://fei1.vsb.cz](http://fei1.vsb.cz) [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: [http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni\\_materialy/se/cast\\_B\\_el\\_stroje/se\\_es\\_c1\\_naprnakr.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/se/cast_B_el_stroje/se_es_c1_naprnakr.pdf)

- [16] *Přesné magnetické snímače a jejich aplikace: Učební texty k semináři* [online]. ČVUT Praha, 25. 6. 2010 [cit. 2012-05-01]. CZ.1.07/2.3.00/09.0031. Dostupné z: [http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura\\_08\\_1006.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_08_1006.pdf). Učební texty. ČVUT Praha.
- [17] Toroidní jádra. [Http://www.thermafm.cz](http://www.thermafm.cz) [online]. 19.01.2010 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://www.thermafm.cz/toroidni-jadra>
- [18] DAYTON, JR., J. A. *DESIGN OF TOROIDAL TRANSFORMERS FOR MAXIMUM EFFICIENCY* [online]. Lewis Research Center National Aeronautics and Space Administration Cleveland, Ohio 44135, 1972 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: [http://ia600501.us.archive.org/7/items/nasa\\_techdoc\\_19720015546/19720015546.pdf](http://ia600501.us.archive.org/7/items/nasa_techdoc_19720015546/19720015546.pdf)
- [19] Toroidní transformátory. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-04-30]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Toroidn%C3%AD-transform%C3%A1tor.jpg>
- [18] Biot-Savartův zákon. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-02]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Biot%C5%AFv-Savart%C5%AFv\\_z%C3%A1kon](http://cs.wikipedia.org/wiki/Biot%C5%AFv-Savart%C5%AFv_z%C3%A1kon)
- [20] 29 *Magnetické materiály* [online]. 2010 [cit. 3.4.2012]. Dostupné z: [https://www.google.cz/search?rlz=1C1GGGE\\_enCZ373CZ386&gcx=w&sourceid=chrome&ie=UTF-8&q=magnetick%C3%A9+materi%C3%A1ly](https://www.google.cz/search?rlz=1C1GGGE_enCZ373CZ386&gcx=w&sourceid=chrome&ie=UTF-8&q=magnetick%C3%A9+materi%C3%A1ly)
- [21] *Bartington Instruments: Mag - 01*. England, 2011. Dostupné z: <http://www.bartington.com/mag-01-mag-01h-single-axis-fluxgate-magnetometers.html>
- [22] *MEDA: Katalog*. USA, 1999. Dostupné z: <http://www.meda.com/catalog/catalog.htm>
- [23] *F.W.Bell: Teslametr 8010*. Pacific Scientific-OECO 4607 SE International Way Milwaukie, OR 97222 1 (503) 659-5999, 2011. Dostupné z: <http://fwbell.com/category/1.aspx>
- [24] Transformátor. *WIKIKNIHY* [online]. 19.12.2011 [cit. 2012-05-03]. Dostupné z: [http://cs.wikibooks.org/wiki/Praktick%C3%A1\\_elektronika/Transform%C3%A1tor](http://cs.wikibooks.org/wiki/Praktick%C3%A1_elektronika/Transform%C3%A1tor)



## Seznam příloh

---

Přílohy jsou shrnuty do příslušných adresářů:

Adresář 1. Přílohy – Měření č. 1

Příloha 1. Tabulky naměřených hodnot

Příloha 2. Grafy naměřených hodnot

Příloha 3. Průběhy z osciloskopu  $h = 0,5 \text{ cm}$

Příloha 4. Průběhy z osciloskopu  $h = 1 \text{ cm}$

Příloha 5. Průběhy z osciloskopu  $h = 1,5 \text{ cm}$

Adresář 2. Přílohy – Měření č. 2

Příloha 6. Tabulky naměřených hodnot

Příloha 7. Grafy naměřených hodnot

Příloha 8. Průběhy z osciloskopu  $U = 230 \text{ V}$

Příloha 9. Průběhy z osciloskopu  $U = 240 \text{ V}$

Příloha 10. Průběhy z osciloskopu  $U = 250 \text{ V}$

Adresář 3. Přílohy – Měření č. 3

Příloha 11. Tabulky naměřených hodnot

Příloha 12. Grafy naměřených hodnot

Příloha 13. Průběhy z osciloskopu  $h = 0 \text{ mm}$

Příloha 14. Průběhy z osciloskopu  $h = 18,23 \text{ mm}$

Příloha 15. Průběhy z osciloskopu  $h = 36,45 \text{ mm}$